



Alexandre Marques Cravinho

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Estudo da ventilação mecânica e natural numa torre de arrefecimento

Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: José Fernando de Almeida Dias, Professor Associado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: José Manuel Paixão Conde, Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa

Arguente: Diana Filipa da Conceição Vieira, Professora Auxiliar Convidada, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa

Vogal: José Fernando de Almeida Dias, Professor Associado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Novembro 2020

Alexandre Marques Cravinho

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Estudo da ventilação mecânica e natural numa torre de arrefecimento

Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: José Fernando de Almeida Dias, Professor Associado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: José Manuel Paixão Conde, Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa

Arguente: Diana Filipa da Conceição Vieira, Professora Auxiliar Convidada, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa

Vogal: José Fernando de Almeida Dias, Professor Associado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa

Novembro 2020

Estudo da ventilação mecânica e natural numa torre de arrefecimento

Copyright © 2020 Alexandre Marques Cravinho, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

A entrega desta dissertação simboliza o término de uma importante viagem de aprendizagem e formação. A chegada a este ponto não teria sido possível sem o apoio de muitas pessoas que de uma maneira ou de outra deixaram o seu cunho ao longo destes anos.

Gostaria primeiramente de deixar uma palavra de agradecimento e apreço ao Professor José Dias, não só pelo apoio e motivação prestados ao longo da elaboração desta tese, mas também devido ao entusiasmo transmitido no leccionamento de diversas cadeiras, momentos em que, na verdade, decidi abordar esta área de investigação.

Deixo também um especial agradecimento a todos os colegas e amigos pelo imenso apoio e disponibilidade a todos os momentos ao longo da elaboração desta tese.

Por fim á Catarina Samuel pela infinita paciência e apoio. E a toda a minha família a quem dedico esta tese.

Resumo

Na presente dissertação analisam-se as potencialidades da ventilação natural e forçada numa torre de arrefecimento de uma central termoelétrica. Para tal, recorreu-se a um modelo analítico simplificado para o estudo da ventilação, já utilizado em trabalhos anteriores, e aqui adaptado para estudo da ventilação natural e forçada na torre de arrefecimento.

O caso de estudo é caracterizado pela documentação técnica da torre de arrefecimento que a partir da mesma e através da sua modelação deu origem ao Caso 0, caso esse capaz de ser estudado e validado no modelo.

Numa primeira fase e após a definição do Caso 0, foram realizados casos variantes do mesmo para serem estudados e comparados do ponto de vista da ventilação natural, onde se fez variar, dimensões estruturais e a velocidade do vento exterior.

Numa segunda fase, é validada a modelação dos ventiladores, utilizados nas simulações com ventilação forçada para o Caso 0, e são simulados todos os casos de ventilação forçada e natural propostos para estudo de resultados e comparações.

Por fim, são discutidos os resultados onde se verificou a importância da impulsão térmica, efeito chaminé, velocidade do vento exterior e o efeito de curto circuito, todos estes relevantes para o estudo da ventilação natural.

Palavras-chave: Ventilação natural, Ventilação mecânica, torre de arrefecimento, modelo simplificado da ventilação natural.

Abstract

In this dissertation, the potential of natural and forced ventilation in a cooling tower of a thermoelectric power station is analyzed. For this purpose, a simplified analytical model was used for the study of ventilation, already used in previous works, and here adapted to study natural and forced ventilation in the cooling tower.

The case study is characterized by the technical documentation of the cooling tower that, from it and through its modeling, gave rise to Case 0, which can be studied and validated in the model.

In a first phase and after the definition of Case 0, variant cases were carried out to be studied and compared from the point of view of natural ventilation, where it was varied, structural dimensions and the speed of the outside wind.

In a second phase, the modeling of the fans, used in simulations with forced ventilation for Case 0, is validated. All cases of forced and natural ventilation proposed for the study of results and comparisons are simulated.

Finally, the results are discussed where the importance of thermal impulse, chimney effect, outdoor wind speed and the short circuit effect were verified, all relevant to the study of natural ventilation.

Keywords: Natural ventilation, Mechanical ventilation, cooling tower, simplified model of natural ventilation.

Índice de matérias

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice de figuras	ix
Índice de tabelas	xiii
Lista de abreviaturas, siglas e símbolos	xv
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Motivação e Enquadramento	1
1.2 Objetivos e Metodologia	4
1.3 Estrutura da Dissertação	5
2 MODELO SIMPLIFICADO DA VENTILAÇÃO NATURAL	7
2.1 Introdução	7
2.2 Equações do modelo simplificado da ventilação natural	7
2.2.1 Equação da continuidade para cada espaço interno i	8
2.2.2 Equações relativas à velocidade nas aberturas	8
2.2.3 Equação da energia para cada espaço interno i	10
2.2.4 Equação de estado dos gases perfeitos para cada espaço interno i	10
3 CASO DE ESTUDO	13
3.1 Introdução	13
3.2 Caracterização da Central.....	13
3.3 Documentação Técnica do Caso de Estudo	15
3.4 Modelação do Caso de Estudo.....	15
3.4.1 Dimensões da Estrutura.....	16
3.4.1.1 Dimensões dos Espaços Internos.....	16
3.4.2 Aberturas	17
3.4.2.1 Modelação da Perda de Carga do Enchimento	19
3.4.2.2 Coeficientes de Pressão nas Aberturas de Ventilação.....	20
3.4.3 Ventiladores.....	22
3.4.3.1 Modelação da Curva do Ventilador	22

3.4.4	Paredes	24
3.4.4.1	Coeficiente Global de Transmissão de Calor das Paredes	24
3.4.5	Fonte de Calor.....	25
3.5	Diferentes Casos para Simulação	25
4	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	31
4.1	Introdução	31
4.2	Caso 0 de Ventilação Forçada e Natural com e sem Fonte de Calor	32
4.3	Coeficiente Global de Transmissão de Calor	34
4.4	Caso 0 com Diferentes Alturas de Torre.....	36
4.5	Caso 0 com Aberturas 12x6 e Diferentes Alturas de Torre	38
4.6	Caso 9 com Aberturas de Diferentes Dimensões	41
4.7	Casos com presença de Curto Circuito	44
4.7.1	Eliminação do Efeito de Curto Circuito.....	45
5	CONCLUSÃO.....	47
	Referências Bibliográficas	49
	Anexo A: Estrutura	51
	Anexo B: Componentes de Enchimento da Torre.....	53
	Anexo C: Ventiladores	55
	Anexo D: Dados Termo-Hidráulicos.....	59

Índice de figuras

Figura 1.1: Diagrama de uma central termoelétrica com uma torre de arrefecimento [1]	1
Figura 1.2: Classificação do tipo de ventilação de uma torre de arrefecimento: (a) natural; (b) forçada; (c) induzida [3]	2
Figura 1.3: Torre de arrefecimento húmida de ventilação natural com fluxo em contracorrente [4]: (a) representação esquemática; (b) imagem ilustrativa	3
Figura 1.4: Torre de arrefecimento húmida de ventilação forçada com fluxo em contracorrente [4]: (a) imagem ilustrativa; (b) representação esquemática	3
Figura 1.5: Torre de arrefecimento húmida de ventilação induzida de fluxo cruzado [5]	4
Figura 3.1: Central Termoelétrica de Ciclos Combinados do Ribatejo [10]	13
Figura 3.2: Diagrama de funcionamento de um grupo de ciclo combinado	14
Figura 3.3: Vista frontal do Caso 0 com respetivas cotas	16
Figura 3.4: Corte vertical da estrutura do Caso 0 com respetiva numeração das variáveis das aberturas e propriedades em cada um dos espaços internos	18
Figura 3.5: Corte horizontal da estrutura do Caso 0 com respetiva numeração das variáveis em cada uma das aberturas de ventilação do espaço interno (1)	18
Figura 3.6: Ponto de funcionamento da torre para um ventilador	19
Figura 3.7: Coeficientes de pressão ao longo da superfície de um cilindro, com $\alpha \in 0, \pi$ e respetivos pontos de $\pi/6$ em $\pi/6$ radianos [12]	21
Figura 3.8: Coeficientes de pressão para cada abertura de ventilação com escala radial dos valores de CP	21
Figura 3.9: Curvas do ventilador, retirados da documentação técnica em Anexo C, a velocidade de 150 RPM e diferentes ângulos de pá	22
Figura 3.10: Gráfico do ventilador com representação dos pontos da curva	23
Figura 3.11: Polinómios de grau 2 interpoladores da curva do ventilador	24
Figura 3.12: Ilustração dos Casos 1, 2 e 3	27
Figura 3.13: Ilustração dos Casos 4, 5, 6, 7, 8 e 9	28
Figura 3.14: Ilustração dos Casos 10, 11, 12 e 13	29
Figura 4.1: Caso 0 com Ventilação Forçada	31

Figura 4.2: Ilustração do Caso 0 para comparação de: (a) ventilação natural; (b) ventilação forçada	32
Figura 4.3: Rph no espaço interno (1) para o Caso 0 com e sem fonte de calor: (a) Ventilação Natural; (b) Ventilação Forçada	33
Figura 4.4: Variação da Temperatura com $Q_1 = 237179000 \text{ W}$ para o Caso 0 de Ventilação Forçada e Natural	33
Figura 4.5: Caso 0 de ventilação natural com paredes adiabáticas e paredes não adiabáticas.....	34
Figura 4.6: Caso 0 de ventilação forçada com paredes adiabáticas e paredes não adiabáticas.....	34
Figura 4.7: Diferença das Rph do espaço interno (1) para o Caso 0 com paredes adiabáticas e paredes não adiabáticas.....	35
Figura 4.8: Ilustração do Caso 0, Caso 1, Caso 2 e Caso 3 de ventilação natural com respectivas alturas de torre	36
Figura 4.9: Rph no espaço interno (1) com $Q_1 = 237179000 \text{ W}$ para o Caso 0 com diferentes alturas de torre	37
Figura 4.10: Velocidade à saída da chaminé com $Q_1 = 237179000 \text{ W}$ para o Caso 0 com diferentes alturas de torre	37
Figura 4.11: Variação da Temperatura no espaço interno (1) com $Q_1 = 237179000 \text{ W}$ para o Caso 0 com diferentes alturas de torre.....	38
Figura 4.12: Ilustração do Caso 4, Caso 5, Caso 6, Caso 7, Caso 8 e Caso 9 de ventilação natural com respectivas alturas de torre	39
Figura 4.13: Rph no espaço interno (1) com $Q_1 = 237179000 \text{ W}$ para aberturas 12x6 e diferentes alturas de torre	40
Figura 4.14: Velocidade à saída da chaminé com $Q_1 = 237179000 \text{ W}$ para aberturas 12x6 e diferentes alturas de torre.....	40
Figura 4.15: Variação da Temperatura no espaço interno (1) com $Q_1 = 237179000 \text{ W}$ para aberturas 12x6 e diferentes de torre	41
Figura 4.16: Ilustração do Caso 10, Caso 11, Caso 12 e Caso 13 de ventilação natural com respectivas alturas de torre	41
Figura 4.17: Rph no espaço interno (1) com $Q_1 = 237179000 \text{ W}$ para casos com diferentes áreas de aberturas de ventilação.....	42

Figura 4.18: Velocidade à saída da chaminé (18) com $Q1 = 237179000 \text{ W}$ para casos com diferentes áreas de aberturas de ventilação.....	43
Figura 4.19: Variação da Temperatura no espaço interno (1) com $Q1 = 237179000 \text{ W}$ para casos com diferentes áreas de aberturas de ventilação.....	43
Figura 4.20: Velocidades nas aberturas de ventilação inferiores com os respectivos CPs para diferentes Casos e $U0 = 15 \text{ (ms)}$, com escala radial dos valores da velocidade .	44

Índice de tabelas

Tabela 3.1: Dimensões da estrutura para o Caso 0	16
Tabela 3.2: Constantes de cada um dos espaços internos do Caso 0	17
Tabela 3.3: Constantes para as aberturas do Caso 0	19
Tabela 3.4: Valores obtidos para a modelação da perda de carga do enchimento	20
Tabela 3.5: Valores retirados da Curva do ventilador	23
Tabela 3.6: Dimensões da estrutura para os Casos 1, 2 e 3	27
Tabela 3.7: Constantes de cada um dos espaços internos para os Casos 1, 2 e 3	27
Tabela 3.8: Dimensões da estrutura para os Casos 4, 5, 6, 7, 8 e 9	28
Tabela 3.9: Constantes de cada um dos espaços internos para os Casos 4, 5, 6, 7, 8 e 9	29
Tabela 3.10: Dimensões da estrutura para os Casos 10, 11, 12 e 13	30
Tabela 3.11: Constantes de cada um dos espaços internos para os Casos 10, 11, 12 e 13	30
Tabela 4.1: Velocidades nas aberturas do Caso 0 simulado e Caso 0 medido	32
Tabela 4.2: Comparação das variáveis das aberturas de ventilação inferiores do Caso 9 com $U_0 = 12$ (ms)	45
Tabela 4.3: Comparação dos parâmetros para eliminação do efeito de curto circuito	45

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

A - Área

A_k - Área da abertura k

A_p - Área da parede p

A_{planta} - Área em planta do espaço interno i

A_V - Área da abertura de ventilação inferior

B_k - Força de impulsão de origem térmica

CFD - Computational Fluid Dynamics

CP - Coeficiente de pressão

C_{pk} - Coeficiente de pressão da abertura exterior k

C_{p0} - Calor específico do ar

D - Diâmetro

D_V - Diâmetro da abertura de ventilação inferior

g - Aceleração da gravidade

GN - Gás natural

H - Altura

H_k - Cota média da abertura k tomada em relação à cota média da abertura mais baixa do espaço interno i

N - Número de incógnitas do problema

$NA(I)$ - Número de aberturas em cada espaço interno I

$NESP$ - Número de espaços internos

P - Pressão

P_0 - Pressão estática de referência

P_i - Pressão no espaço interno i

P_k - Pressão no exterior da abertura k

Q - Caudal volúmico

Q_i - Calor gerado no espaço interno i

RNT - Rede nacional de transporte de eletricidade

Rot - Velocidade em rotações por minuto do ventilador

Rph - Renovações por hora

R_{ref} - Velocidade de referência em rotações por minuto do ventilador

ΔT - Variação entre a temperatura do espaço interno i e a temperatura exterior

T_0 - Temperatura exterior

T_i - Temperatura do espaço interno i

U_0 - Velocidade do vento

U_k - Velocidade média na abertura k

U_p - Coeficiente global de transmissão de calor da parede p

V - Volume

$\Delta\rho_i$ - Diferença entre a massa volúmica do ar no espaço interno i e a massa volúmica do ar exterior

ρ_i - Massa volúmica do ar no espaço interno i

ρ_0 - Massa volúmica do ar no exterior

ζ_k - Coeficiente de perda de carga da abertura k

ζ_{in} - Coeficiente de perda de carga à saída da chaminé quando o ar entra

ζ_{out} - Coeficiente de perda de carga à saída da chaminé quando o ar sai

1

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e Enquadramento

Desde o seu início, a humanidade tem demonstrado incrível ambição e determinação para o progresso, desenvolvendo inúmeras ferramentas com esse objetivo em vista. No decorrer desta jornada está a necessidade da produção de energia que por sua vez tem tido maior relevância e impacto quer a nível social quer a nível ambiental ao longo do decorrer dos anos.

Com a introdução de grandes centrais e indústrias nas áreas da produção de energia elétrica, arrefecimento, petroquímica, aço, entre outras, existe, em várias fases dos seus processos a necessidade da dissipação de grandes quantidades de calor para a atmosfera, que por sua vez pode ser realizada através de uma torre de arrefecimento.

A Figura 1.1 demostra um exemplo da aplicação de uma torre de arrefecimento numa central de geração de energia através de uma turbina a vapor. O calor é libertado para a atmosfera pela torre de arrefecimento através de um ciclo secundário de água, normalmente denominado de circuito de arrefecimento.

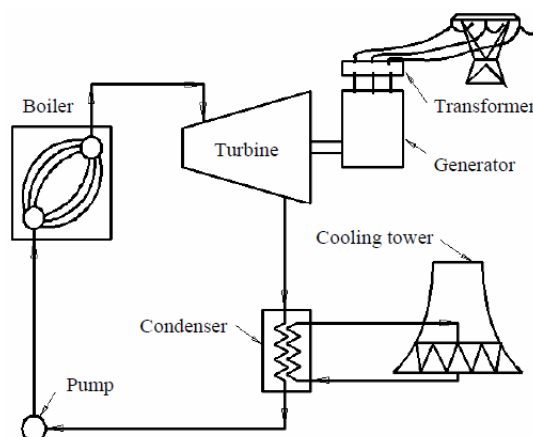


Figura 1.1: Diagrama de uma central termoelétrica com uma torre de arrefecimento [1]

Existem vários tipos de torres de arrefecimento, no entanto para o presente trabalho serão apenas abordadas as torres de arrefecimento húmidas, torres essas que se caracterizam pela troca de calor que ocorre quando a água está em contato direto com o ar. O arrefecimento é o resultado da transferência de calor sensível e latente, onde o componente de transferência de calor latente geralmente é o de maior predominância no processo. Este por sua vez é definido pela evaporação da água para absorver o calor. A evaporação ocorre quando as moléculas de água sofrem colisões internas que aumentam a sua energia acima da sua energia de ligação. Essa energia provém da água que não evapora, o que resulta no seu arrefecimento [2].

As torres de arrefecimento húmidas podem ser classificadas de acordo com o tipo de extração ou ventilação através da torre, natural, forçada e induzida, estando estas representadas na Figura 1.2.

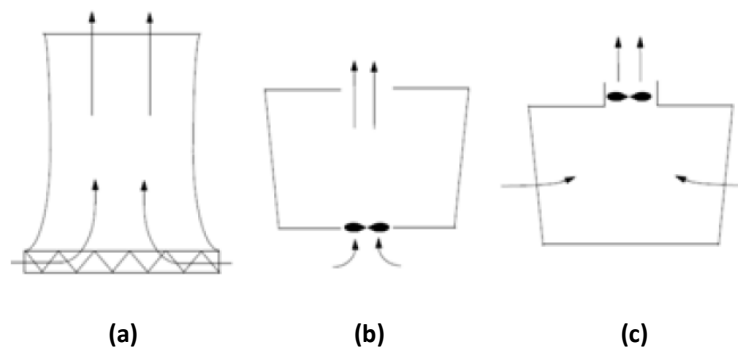


Figura 1.2: Classificação do tipo de ventilação de uma torre de arrefecimento: (a) natural; (b) forçada; (c) induzida [3]

A Figura 1.3 demonstra um exemplo de uma torre de arrefecimento húmida de ventilação natural. O fluxo ou escoamento de ar neste tipo de torres é estabelecido pelo efeito da impulsão térmica, que ocorre devido às diferenças de massa volúmica do ar no interior e exterior da torre, ar com maior massa volúmica e menor temperatura e ar com menor massa volúmica e maior temperatura, no exterior e interior da torre respetivamente. Embora o estudo do arrefecimento evaporativo remonte a épocas longínquas, a primeira torre de arrefecimento de ventilação natural foi construída apenas em 1916 em Emma Pit, na Holanda, pela Dutch State Mines. Estas podem variar em altura consoante as especificações exigidas, no entanto e por norma variam entre valores de 80-200 m de altura, sendo que a mais alta em registo tem 200 m e está situada na central de Niederaussem na Alemanha [1].

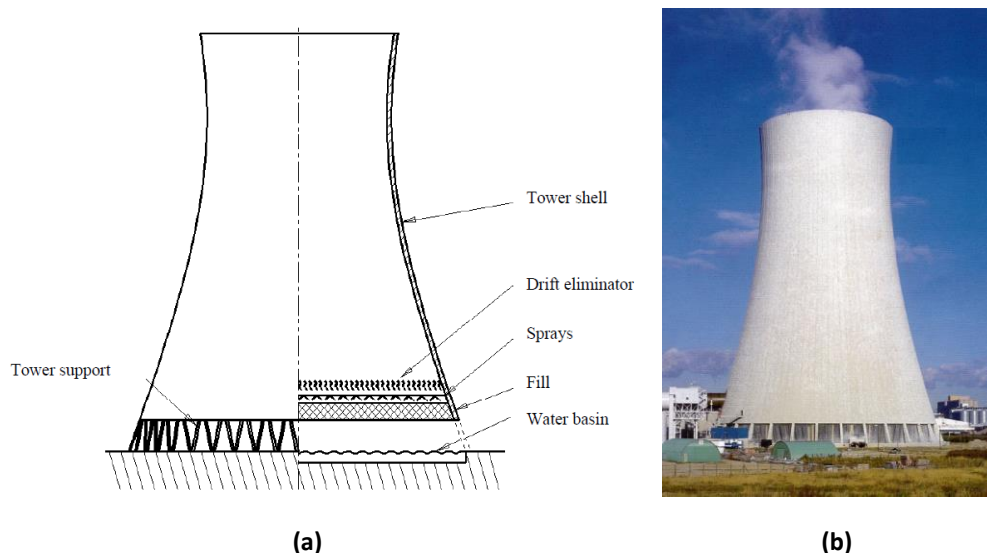


Figura 1.3: Torre de arrefecimento húmida de ventilação natural com fluxo em contracorrente [4]: (a) representação esquemática; (b) imagem ilustrativa

A Figura 1.4 demonstra um exemplo de uma torre de arrefecimento húmida com ventilação mecânica, que por sua vez é estabelecida por ventiladores que forçam ou induzem o ar através da torre, denominadas de ventilação forçada e ventilação induzida, respetivamente.

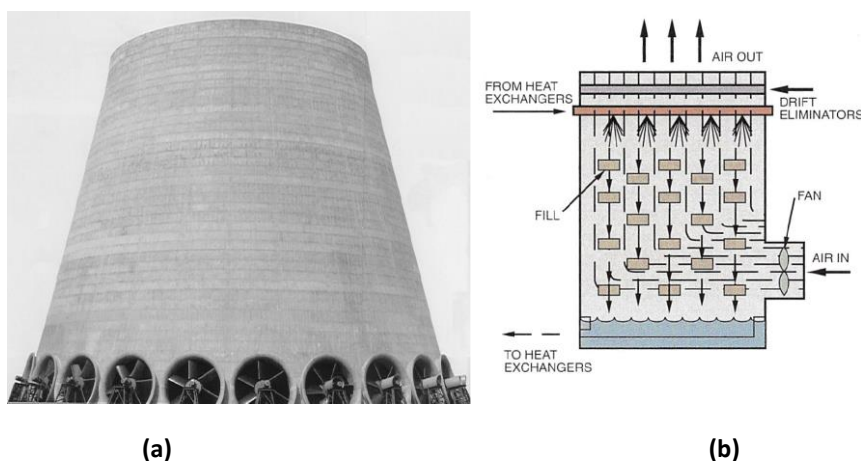


Figura 1.4: Torre de arrefecimento húmida de ventilação forçada com fluxo em contracorrente [4]: (a) imagem ilustrativa; (b) representação esquemática

Uma outra característica é definida pela circulação relativa entre os caudais de água e ar: se o escoamento de ar, que atravessa o fluxo descendente de água quente, for perpendicular a este denominam-se torres de fluxo cruzado. Se o escoamento de ar for em sentido contrário ao escoamento de água, denominam-se torres de fluxo em contracorrente. As Figuras 1.3 e 1.4 demonstram exemplos de torres de arrefecimento

de fluxo em contracorrente, enquanto que a Figura 1.5 demonstra uma representação esquemática de uma torre de arrefecimento de fluxo cruzado de ventilação induzida.

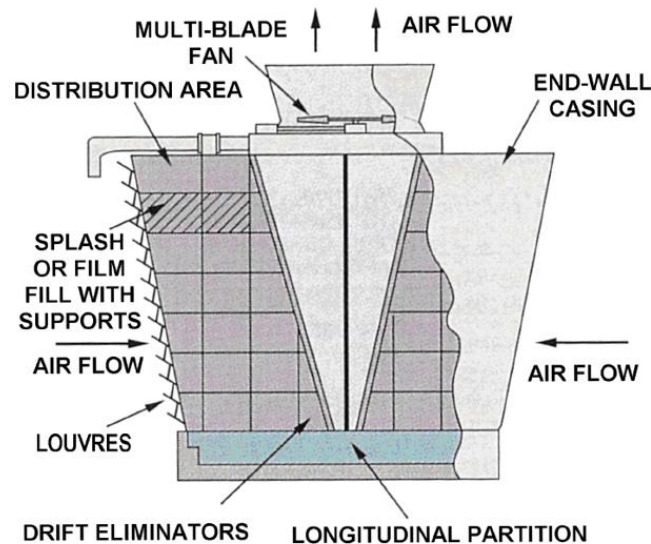


Figura 1.5: Torre de arrefecimento húmida de ventilação induzida de fluxo cruzado [5]

1.2 Objetivos e Metodologia

Com o presente trabalho é intenção estudar e caracterizar para diferentes condições exteriores, interiores e estruturais a torre de arrefecimento de ventilação forçada existente na Central Termoelétrica de Ciclos Combinados do Ribatejo, pertencente ao grupo EDP. O estudo é realizado num programa que recorre a um modelo analítico e simplificado de ventilação em estruturas com n espaços internos em comunicação entre si.

O modelo utiliza as equações da continuidade, quantidade de movimento e da energia, bem como o conhecimento empírico dos coeficientes de perda de carga das aberturas e dos coeficientes de pressão devido à ação do vento sobre a estrutura, para através do modelo, obter os parâmetros de ventilação mais relevantes.

O modelo permite a obtenção de variáveis, suficientes para descrever o comportamento do escoamento para cada situação em particular, como por exemplo as velocidades nas aberturas e propriedades médias em cada espaço. Fazendo variar a geometria da estrutura, os componentes de ventilação e as condições exteriores, obtêm-se soluções para cada caso, tornando-se possível, posteriormente, fazer uma análise comparativa para as diversas situações escolhidas, sendo este um dos objetivos do presente trabalho.

1.3 Estrutura da Dissertação

Este trabalho divide-se em 5 capítulos. No presente capítulo são sucintamente definidos os objetivos, a motivação e o enquadramento para a realização do estudo, bem como a metodologia utilizada.

No segundo capítulo é descrito todo o modelo analítico simplificado para a ventilação natural.

No capítulo 3 é descrito todo o caso de estudo. Este contem: a descrição da central onde a torre de arrefecimento está inserida; a documentação técnica da torre necessária para a realização do estudo; a caracterização das modelações necessárias para adaptar o caso de estudo para um passível de ser estudado no modelo; e a caracterização dos diferentes casos propostos para simulação.

No capítulo 4 são apresentados e analisados os resultados das diversas simulações.

Por fim, no quinto capítulo, temos as conclusões e sugestões para futuros campos de pesquisa.

MODELO SIMPLIFICADO DA VENTILAÇÃO NATURAL

2.1 Introdução

A ventilação natural surge devido à diferença de pressão entre as aberturas colocadas nas fachadas dos edifícios e estruturas, gerada por ação do vento e pela variação da densidade do ar resultante das variações da temperatura.

O programa utilizado no presente trabalho tem como base um modelo analítico simplificado para a ventilação natural. Este considera um edifício ou estrutura constituído por n número de espaços internos, onde as propriedades da temperatura, pressão e massa volúmica são consideradas uniformes. Sendo, no entanto, consideradas as variações de pressão hidrostática entre as aberturas a cotas diferentes. Cada espaço interno está em comunicação com o exterior ou com os restantes espaços através de m aberturas e l paredes. Como tal, foi imprescindível o conhecimento dos trabalhos realizados com o uso e descrição do respetivo programa, [6], [7], [8] e [9].

Para determinar os principais parâmetros ligados á ventilação natural como as taxas de renovação de um espaço, as diferenças de temperatura e pressão no interior dos espaços internos e as velocidades nas aberturas, o programa recebe um ficheiro de dados com valores da geometria do edifício e condições exteriores e interiores ao mesmo. O programa começa por calcular o número de incógnitas N do problema

$$N = \sum_{I=1}^{NESP} (NA(I) + 3) \quad (2.1)$$

$NESP$ diz respeito ao número de espaços internos e $NA(I)$ é o número de aberturas em cada espaço interno, I . Para cada um destes espaços o programa resolve através de um processo iterativo 3 incógnitas com os valores da pressão, massa volúmica e temperatura do espaço interno.

2.2 Equações do modelo simplificado da ventilação natural

As equações que regem este modelo estão descritas no presente subcapítulo, foi assumido que em cada espaço interno do edifício, a variação de pressão é hidrostática, a temperatura é constante e a variação de densidade é desprezável, exceto nos casos onde existam forças de impulsão de origem térmica.

2.2.1 Equação da continuidade para cada espaço interno i

$$\sum_{k=1}^{m_i} U_k A_k = 0 \quad (2.2)$$

Onde U_k é a velocidade média na abertura k e A_k a sua respetiva área. De notar que, a velocidade U_k é positiva quando o ar entra no espaço i e negativa quando o ar sai do espaço i .

2.2.2 Equações relativas à velocidade nas aberturas

As equações utilizadas para a obtenção da velocidade em cada uma das aberturas são equações de Bernoulli adaptadas a cada tipo de abertura.

- Aberturas simples interiores

$$(\Delta\rho_i H_k - \Delta\rho_i^* H_k^*)g + (P_i^* - P_i) - \frac{1}{2}\zeta_k \rho_0 U_k |U_k| = 0 \quad (2.3)$$

Onde o primeiro termo corresponde à impulsão térmica, o segundo às diferenças de pressão e o terceiro às perdas de carga na abertura. O índice (*) indica os valores das variáveis no espaço em comunicação com o espaço i , através da abertura k . Nesta mesma equação, ζ_k é o coeficiente de perda de carga da abertura k , valor obtido experimentalmente.

- Aberturas simples exteriores

Para a situação em que a abertura k comunica com o exterior, temos:

$$(\Delta\rho_i H_k)g + \left(\frac{1}{2}\rho_0 U_0^2 C_{pk} - \Delta P_i\right) - \frac{1}{2}\zeta_k \rho_0 U_k |U_k| = 0 \quad (2.4)$$

Comparando com a equação anterior verifica-se que o termo corresponde ao espaço em comunicação com o espaço i passa a ser $\frac{1}{2}\rho_0 U_0^2 C_{pk}$, correspondente à abertura k exterior.

- Ventilador de velocidade variável

As equações para os ventiladores são obtidas a partir das curvas de funcionamento características do ventilador, e aproximadas por um polinómio de 2º grau. Assim, tendo em conta a análise adimensional para considerar as diferentes velocidades de rotação do ventilador, obtém-se:

- Insuflador

$$(\Delta\rho_i H_k - \Delta\rho_i^* H_k^*)g + (P_i^* - P_i) = A_v \times U \times |U| + B_v \left(\frac{Rot}{R_{ref}}\right)^2 \quad (2.5)$$

- Exaustor

$$(\Delta\rho_i H_k - \Delta\rho_i^* H_k^*)g + (P_i^* - P_i) = A_v \times U \times |U| - B_v \left(\frac{Rot}{R_{ref}} \right)^2 \quad (2.6)$$

Onde A_v e B_v são constantes obtidas dessa interpolação, para um determinado ventilador. O termo Rot é o número de rotações por minuto a que o ventilador está a funcionar e R_{ref} é a velocidade de referência para a qual foram obtidos os valores de A_v e B_v . No capítulo 3 será apresentada com mais detalhe esta modelação, para o ventilador considerado.

- Chaminé cilíndrica

As equações para este tipo de abertura foram obtidas experimentalmente [6] tendo em conta tanto o seu funcionamento quer como exaustor, quer como insuflador, e podem ser expressas pelas seguintes relações:

$$\Delta\rho_i H_k g - P_i + C_{pk} \frac{1}{2} \rho_0 U_0^2 - (1 - \zeta_{in}) \frac{1}{2} \rho_0 U_i^2 = 0 \quad (2.7)$$

- Insuflador

Quando o vento entra na chaminé, esta funciona como insuflador ($\frac{U_i}{U_0} < 0$)

$$\Delta\rho_i H_k g - P_i + C_{pk} \frac{1}{2} \rho_0 U_0^2 - F \left(\frac{U_i}{U_0} \right) \frac{1}{2} \rho_0 U_i^2 = 0 \quad (2.8)$$

Em que:

$$F \left(\frac{U_i}{U_0} \right) = -1,25 \sin \left(\frac{\pi}{2} \frac{U_i}{0,8 U_0} \right) \text{ se } -0,8 \leq \frac{U_i}{U_0} \leq 0 \quad (2.9)$$

$$F \left(\frac{U_i}{U_0} \right) = -1,25 \text{ se } -1,0 \leq \frac{U_i}{U_0} \leq -0,8 \quad (2.10)$$

- Exaustor

Quando o vento é extraído pela chaminé, esta funciona como exaustor ($\frac{U_i}{U_0} \geq 0$)

$$\Delta\rho_i H_k g - P_i - (1 - \zeta_{out}) \frac{1}{2} \rho_0 U_i^2 = 0 \quad (2.11)$$

Nas expressões anteriores, $C_{pk} = -1,15$ é o coeficiente de pressão do vento à saída da chaminé quando, $U_i = 0$, $\zeta_{in} = 0,8$ e $\zeta_{out} = 1,1$ são os coeficientes de perda de carga à saída da chaminé, respetivamente, quando o ar entra ou sai [6]. O termo U_i refere-se à velocidade na abertura da chaminé e o termo U_0 à velocidade do vento exterior.

Considerando que o edifício pode ser constituído por vários espaços com várias aberturas interiores e exteriores, a pressão exercida pela velocidade do vento no exterior da abertura que comunica com o ambiente (P_k) é:

$$P_k = \frac{1}{2} C_{pk} \rho_0 U_0^2 \quad (2.12)$$

Onde C_{pk} , é também um parâmetro experimental, correspondente ao coeficiente de pressão no exterior da abertura k devido à ação do vento, e pode ser expresso por:

$$C_{pk} = \frac{P_k - P_0}{\frac{1}{2} \rho U_0^2} \quad (2.13)$$

Quando existe diferença de temperatura nos espaços interiores e exteriores do edifício, a força de impulsão térmica é:

$$B_k = -\Delta \rho_i H_k g \quad (2.14)$$

Onde $\Delta \rho_i = \rho_i - \rho_0$ é a diferença entre a massa volúmica do ar no espaço i (ρ_i) e a massa volúmica do ar (ρ_0), H_k representa a cota média da abertura k tomada em relação à cota média da abertura mais baixa no espaço interno i .

No caso em que a variação de pressão entre o exterior e o interior do edifício tem como os únicos elementos dissipativos as aberturas na parede:

$$\Delta P_k = \frac{1}{2} \zeta_k \rho_0 U_k |U_k| \quad (2.15)$$

Onde ζ_k indica o coeficiente de perda de carga para a abertura k .

2.2.3 Equação da energia para cada espaço interno i

Assumindo Q_i como o calor gerado no espaço i , o coeficiente k correspondente à respetiva abertura, e p à respetiva parede em contacto com o referido espaço, vem:

$$Q_i + \sum_{n=1}^{m_i} (\rho_0 c_{p0} U_k A_k T^+) + \sum_{n=1}^{m_i} U_p A_p (T_i - T_i^{**}) = 0 \quad (2.16)$$

O coeficiente $**$ corresponde ao espaço em comunicação com o espaço i através da parede p . O valor de T^+ é igual T_i se a velocidade média na abertura for negativa ou igual a T_i^* , caso esta seja positiva. A_p é a área das paredes do espaço i e U_p o coeficiente global de transmissão de calor. Esta equação foi introduzida para os casos em que existe uma fonte interna de calor no espaço i .

2.2.4 Equação de estado dos gases perfeitos para cada espaço interno i

Para finalizar este conjunto de equações, assume-se que o ar tem o comportamento de um gás ideal, sendo a equação de estado para cada espaço interno dada por:

$$\frac{\Delta \rho_i}{\rho_0} + \frac{T_i - T_0}{T_0} = 0 \quad (2.17)$$

O programa determina os principais parâmetros ligados ao problema da ventilação de uma estrutura com i espaços internos, cada um com $k(i)$ aberturas, partindo do conhecimento da distribuição de pressões resultantes da ação do vento obtida experimentalmente em modelos do edifício na zona das aberturas, das características de funcionamento da chaminé e ventiladores, também obtidas experimentalmente. O problema fica caracterizado por um sistema de n equações algébricas não lineares a n incógnitas, que é resolvido pelo método de Brown [6].

3

CASO DE ESTUDO

3.1 Introdução

No seguimento do que foi abordado no subcapítulo 1.1, decidiu-se fazer a análise das potencialidades da torre de arrefecimento do Grupo 3 de ventilação forçada existente na Central Termoelétrica de Ciclos Combinados do Ribatejo. Como contextualização é necessário fazer uma breve abordagem da central onde esta está inserida. Em seguida, detalhar as modelações necessárias para adaptar o caso de estudo ao modelo.

3.2 Caracterização da Central

A Central do Ribatejo Figura 3.1 contém 3 unidades ou grupos de produção, com potência unitária nominal de 392 MW (na emissão, em condições ambientais ISO). Com recurso à tecnologia de ciclo combinado que permite alcançar um rendimento de conversão energética superior a 57.5 % (referido ao poder calorífico inferior do GN), [10].



Figura 3.1: Central Termoelétrica de Ciclos Combinados do Ribatejo [10]

Quanto à configuração da Central do Ribatejo, cada grupo é constituído pelos seguintes componentes principais, comuns a uma configuração de uma central de ciclos combinados e ilustrados na Figura 3.2:

- turbina a gás, para queima exclusiva de Gás Natural (1);
- gerador de vapor (caldeira) de recuperação de calor, sem queima adicional (2);
- turbina a vapor, de condensação, com reaquecimento e três corpos de expansão (alta, média e baixa pressão) (3);
- alternador montado em veio único acionado por ambas as turbinas (4);
- transformador principal, elevador da tensão de geração (20kV) para a tensão da RNT (220kV no Grupo 1 e 400kV nos Grupos 2 e 3).

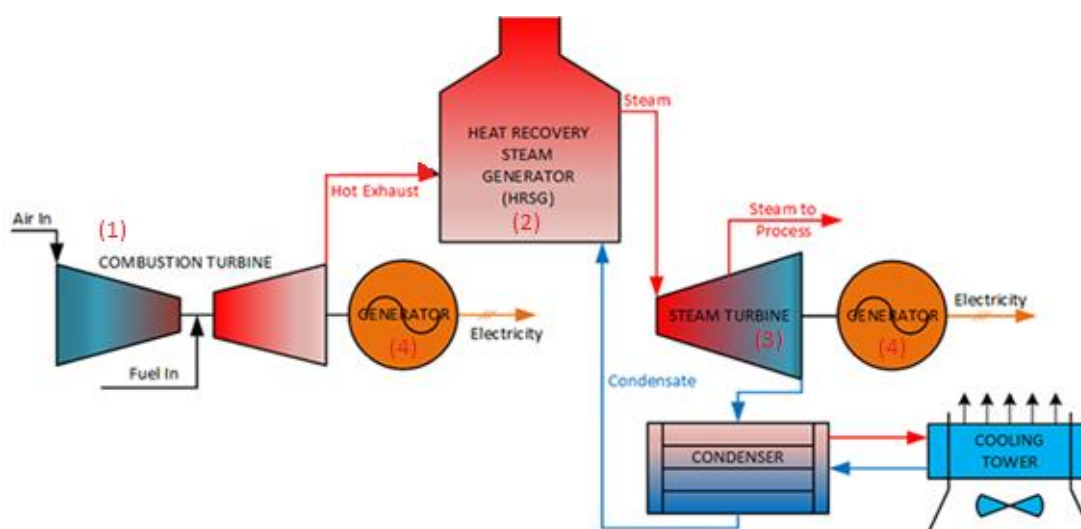


Figura 3.2: Diagrama de funcionamento de um grupo de ciclo combinado

É caracterizada por um veio único, onde as duas turbinas acionam um mesmo alternador. Na turbina a gás, a expansão dos gases da combustão de GN misturados com o ar ambiente previamente comprimido, impulsiona a rotação desta turbina e do alternador, sendo responsável por cerca de 2/3 da energia elétrica produzida. O calor residual dos gases de escape da turbina a gás é utilizado, sem queima adicional de GN, na caldeira de recuperação para gerar o vapor que aciona a turbina a vapor. Ligada ao mesmo alternador, pela outra extremidade do veio comum, esta turbina é responsável pelo restante 1/3 da energia total produzida.

O arrefecimento do condensador de vapor é obtido pela circulação de água em circuito fechado através de uma torre de arrefecimento com ventilação forçada. Existem duas torres de arrefecimento, observadas na Figura 3.1, com 60 metros de altura: uma, comum aos Grupos 1 e 2 (direita), e outra, de menor diâmetro, exclusiva do Grupo 3 (esquerda).

Neste circuito de arrefecimento, a água perdida por evaporação na torre é visível numa pluma de condensação que se forma no respetivo topo superior e é compensada através do abastecimento de água proveniente do rio Tejo, após tratamento prévio de decantação, cloragem e filtração.

A Central dispõe de instalações auxiliares comuns aos 3 grupos que incluem:

- uma estação de desmineralização de água, destinada a abastecer o ciclo de vapor dos grupos;
- uma caldeira auxiliar a GN para produção de vapor no arranque;
- um gerador de emergência com motor diesel para alimentação elétrica em caso de falha na alimentação pela RNT.

A sala de comando está localizada no edifício administrativo, de onde são feitos o comando remoto e a vigilância da operação dos 3 grupos. Esta operação é largamente automatizada por um sistema de controlo de avançada tecnologia digital. A equipa de operação que assegura em permanência a condução da Central é limitada a um operador por cada grupo e a um supervisor de turno.

3.3 Documentação Técnica do Caso de Estudo

A documentação técnica do caso de estudo, com os respetivos componentes e características estão presentes em anexo com a seguinte orientação:

- Anexo A: Estrutura;
- Anexo B: Componentes de Enchimento da Torre;
- Anexo C: Ventiladores;
- Anexo D: Dados Termo-Hidráulicos.

3.4 Modelação do Caso de Estudo

No presente subcapítulo vão ser abordadas as modelações realizadas com base na documentação técnica anteriormente referida para adaptar a torre de arrefecimento do Grupo 3 (caso de estudo) para uma passível de ser estudada no modelo simplificado da ventilação natural.

A primeira modelação será definida por Caso 0, esta irá representar a base de comparação para com os restantes casos que serão descritos e caracterizados no subcapítulo 3.5.

Neste seguimento, serão abordados os componentes e características do caso de estudo com a seguinte ordem:

1. Dimensões da estrutura;

2. Aberturas;
3. Ventiladores;
4. Paredes;
5. Fonte de calor.

3.4.1 Dimensões da Estrutura

Na figura 3.3 observa-se a vista frontal da modelação da estrutura do Caso 0 e a Tabela 3.1 representa os valores das respectivas cotas. Foi considerada uma espessura constante em toda a parede da torre de 0.4 m.

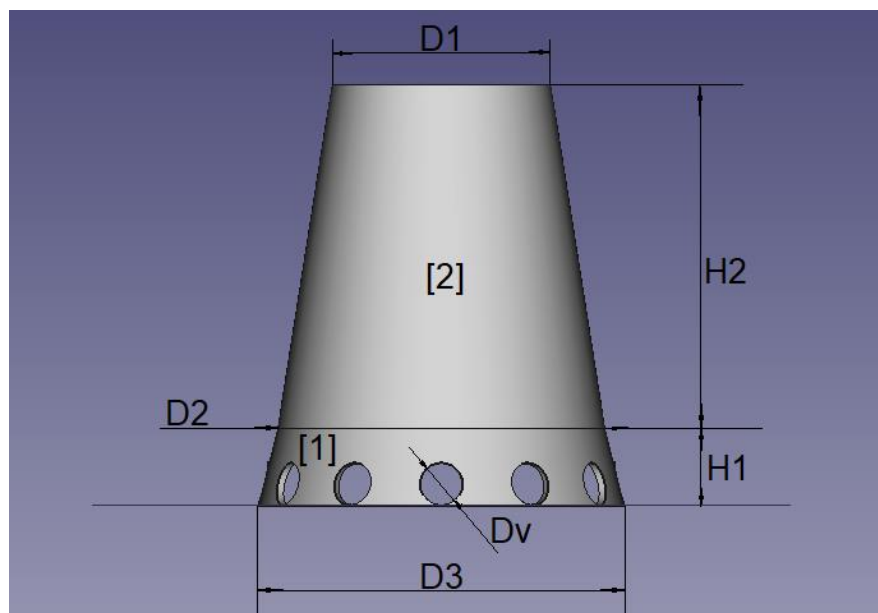


Figura 3.3: Vista frontal do Caso 0 com respectivas cotas

Tabela 3.1: Dimensões da estrutura para o Caso 0

Dimensões	H_{total}	$H1$	$H2$	$D1$	$D2$	$D3$	D_v
Estrutura	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
Caso 0	60	11	49	29.5	45	50.3	6.1

3.4.1.1 Dimensões dos Espaços Internos

A estrutura está dividida em dois espaços, como representado na Figura 3.3 e 3.4, espaço interno (1) que é caracterizado:

- pela presença das aberturas de ventilação, com ventiladores ou sem, caso seja feita uma simulação de ventilação forçada ou natural, respetivamente;

- pela presença da carga térmica correspondente ao calor libertado pela água;
- e pela abertura interior que representa a perda de carga existente devido ao enchimento da torre, que por sua vez faz a comunicação entre o espaço interno (1) e o espaço interno (2);

O espaço interno (2), esta caracterizado por:

- uma abertura interior partilhada e em comunicação com o espaço interno (1);
- uma abertura no topo da torre considerada abertura do tipo chaminé.

Foram atribuídos valores para as diferentes constantes presentes em cada um dos espaços calculados através dos valores definidos na Tabela 3.1 e representados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Constantes de cada um dos espaços internos do Caso 0

Dimensões	Espaço (1)				Espaço (2)			
	<i>Volume</i>	<i>A_{planta}</i>	<i>A_p</i>	<i>H_k</i>	<i>Volume</i>	<i>A_{planta}</i>	<i>A_p</i>	<i>H_k</i>
Espaços Internos	(<i>m</i> ³)	(<i>m</i> ²)	(<i>m</i> ²)	(<i>m</i>)	(<i>m</i> ³)	(<i>m</i> ²)	(<i>m</i> ²)	(<i>m</i>)
Caso 0	19636	1987.1	1343	7.95	54170	1590.4	5805	49

3.4.2 Aberturas

Observando as aberturas a partir dos espaços internos existentes, representadas nas Figuras 3.4 e 3.5, estas são caracterizadas como:

- Aberturas 1-12 – correspondentes às aberturas de ventilação, localizadas na base da torre e pertencentes ao espaço interno (1), que por sua vez podem conter ventiladores ou não, no caso em que tenham apenas aberturas de ventilação é necessário atribuir valores tabelados de coeficientes de perdas de carga;
- Abertura 13-17 – representam a mesma abertura interna, a perda de carga associada ao enchimento da torre, situada entre o espaço interno (1) e o espaço interno (2), abertura 13 corresponde à abertura interior do espaço (1) para o (2) e a abertura 17 do espaço (2) para o espaço (1);
- Abertura 18 – corresponde à abertura no topo da torre que por sua vez, para o modelo, comporta-se como a abertura de uma chaminé, pertencente ao espaço interno (2).

Para definir as aberturas é necessário calcular as áreas das mesmas, definir os coeficientes das perdas de carga e os coeficientes de pressão em contacto com o ar exterior, representados na Tabela 3.3, com os cálculos efetuados nos dois subcapítulos seguintes. Foi considerado que a abertura (1) está sempre perpendicular à direção do vento exterior.

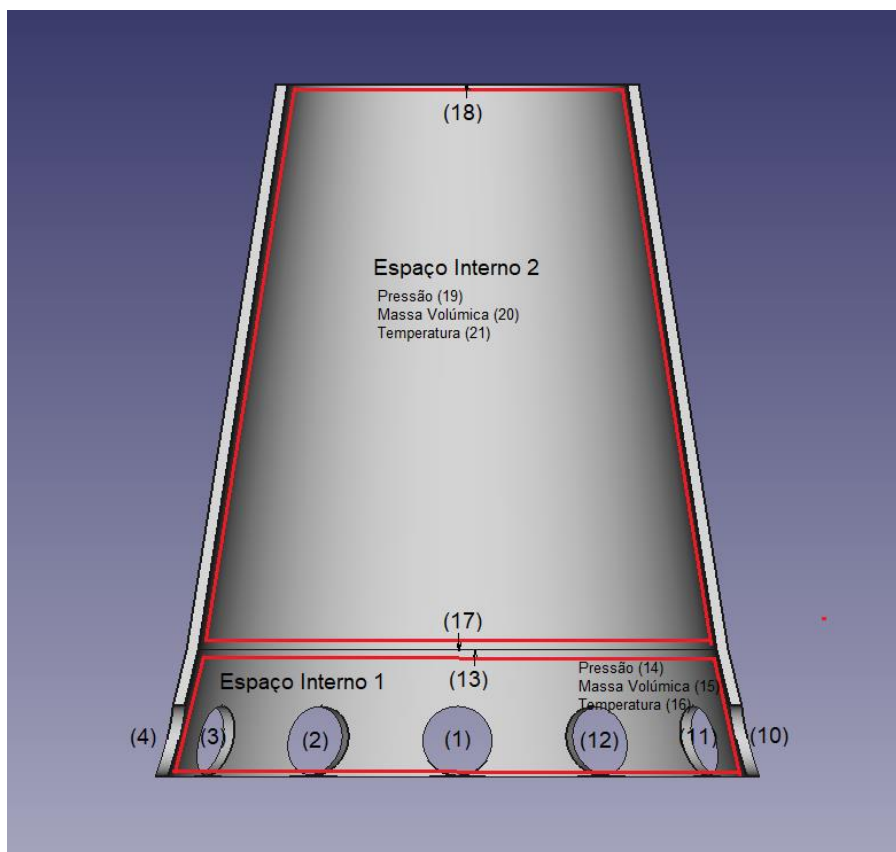


Figura 3.4: Corte vertical da estrutura do Caso 0 com respectiva numeração das variáveis das aberturas e propriedades em cada um dos espaços internos

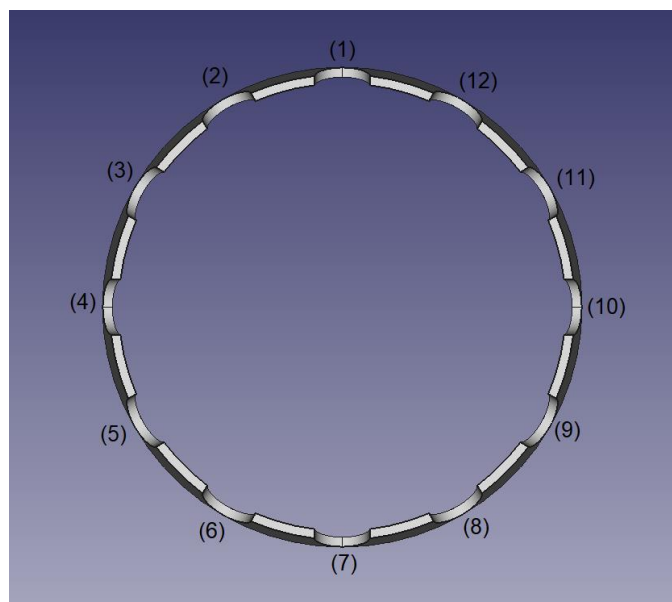


Figura 3.5: Corte horizontal da estrutura do Caso 0 com respectiva numeração das variáveis em cada uma das aberturas de ventilação do espaço interno (1)

Tabela 3.3: Constantes para as aberturas do Caso 0

Abertura, k	A_k (m^2)	ζ_k	C_{Pk}
1	29.2	2.5	1.2
2	29.2	2.5	0.65
3	29.2	2.5	-0.45
4	29.2	2.5	-0.9
5	29.2	2.5	-0.75
6	29.2	2.5	-0.575
7	29.2	2.5	-0.5
8	29.2	2.5	-0.575
9	29.2	2.5	-0.75
10	29.2	2.5	-0.9
11	29.2	2.5	-0.45
12	29.2	2.5	0.65
13-17	1590.4	52.1	0.0
18	683.5	1.1	-1.15

3.4.2.1 Modelação da Perda de Carga do Enchimento

Os coeficientes das perdas de carga para as aberturas de ventilação (aberturas 1-12) e o da saída no topo da torre (abertura 18) têm valores tabelados [11].

No entanto, é necessário calcular o coeficiente de perda de carga para a abertura 13-17, representativa do enchimento da torre, para tal, recorreu-se às dimensões das aberturas do Caso 0 presentes na Tabela 3.3 e ao ponto de funcionamento da torre, Figura 3.6, retirada da documentação técnica do ventilador definida para o ângulo de pá de 18.8 graus e presente em Anexo C.

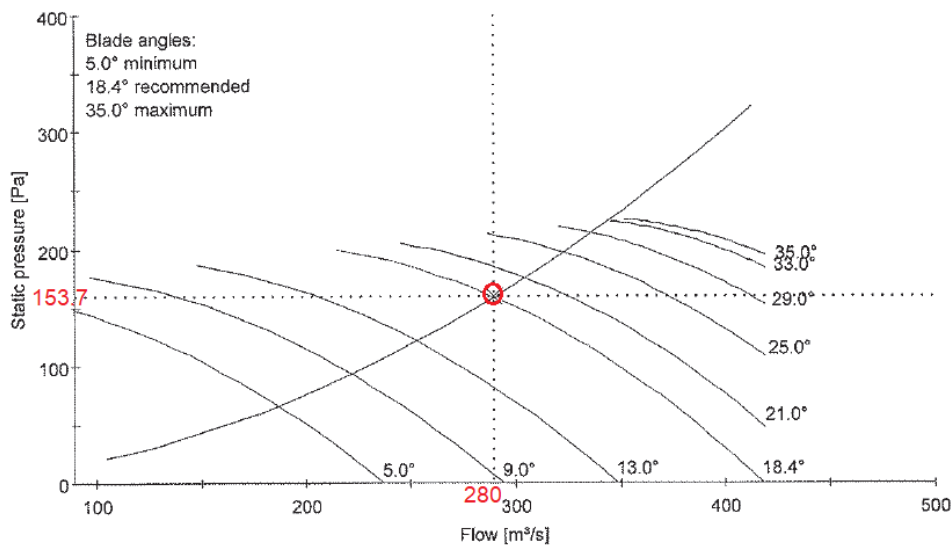


Figura 3.6: Ponto de funcionamento da torre para um ventilador

O valor da ΔP no ponto de funcionamento mantém-se devido à torre operar com os 12 ventiladores em paralelo. No entanto, é necessário multiplicar o valor do Caudal por 12. Os valores obtidos das áreas e velocidades na abertura 13-17 e 18 estão representados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Valores obtidos para a modelação da perda de carga do enchimento

Ponto de Funcionamento	ΔP (Pa)	Q (m^3/s)
1 ventilador	153.7	280
12 ventiladores	153.7	3360
Abertura, k	A_k (m^2)	U_k (m/s)
13-17	1590.4	2.1
18	683.5	4.9

Recorrendo à equação de Bernoulli para a abertura 13-17 e 18 temos,

$$\Delta P = \frac{1}{2} \times \rho \times \zeta_{18} \times U_{18}^2 + \frac{1}{2} \times \rho \times \zeta_{13-17} \times U_{13-17}^2 \quad (3.1)$$

Sendo $\rho_{ar} = 1.2 \text{ Kg}/m^3$ para a temperatura de 20°C e o coeficiente de perda de carga na abertura à saída da chaminé $\zeta_{18} = 1.1$ obtemos,

$$\zeta_{13-17} = 52.1$$

3.4.2.2 Coeficientes de Pressão nas Aberturas de Ventilação

Apenas as aberturas em contacto com o vento exterior estão sujeitas ao coeficiente de pressão. Para o caso da abertura 18 (abertura do tipo chaminé), foi considerada a equação (2.11) a que corresponde um coeficiente de pressão igual a -1.15 quando não há escoamento pela chaminé.

Para as aberturas dos ventiladores (aberturas 1-12) foi considerada, para a respetiva parede, uma geometria cilíndrica para a obtenção de valores de CP pois, aproxima-se da geometria modelada para o caso 0, representada na Figura 3.3. Recorrendo à Figura 3.7, representação dos valores dos coeficientes de pressão num cilindro com recurso a CFD [12], foram retirados os respetivos coeficientes de cada uma das aberturas de ventilação, estando estas localizadas de $\frac{\pi}{6}$ em $\frac{\pi}{6}$ radianos. Estes valores estão presentes na Tabela 3.3 e representados na Figura 3.8.

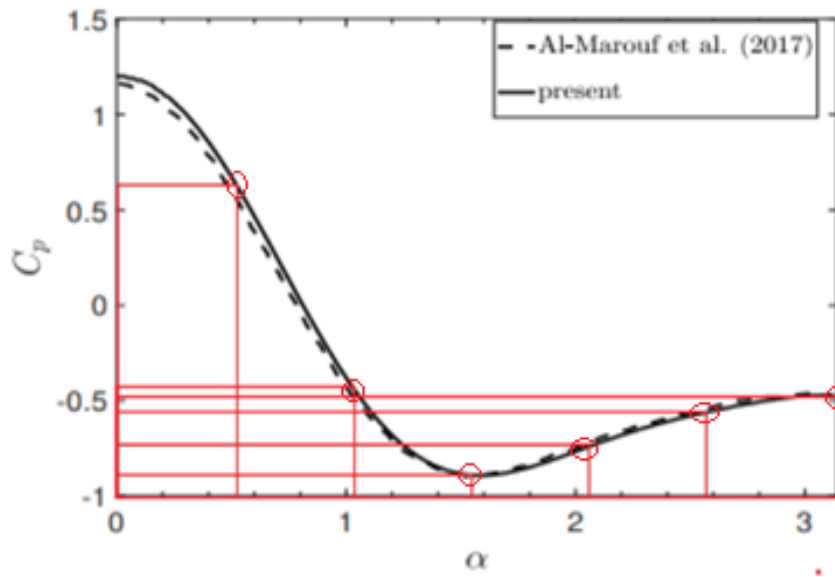


Figura 3.7: Coeficientes de pressão ao longo da superfície de um cilindro, com $\alpha \in [0, \pi]$ e respectivos pontos de $\frac{\pi}{6}$ em $\frac{\pi}{6}$ radianos [12]

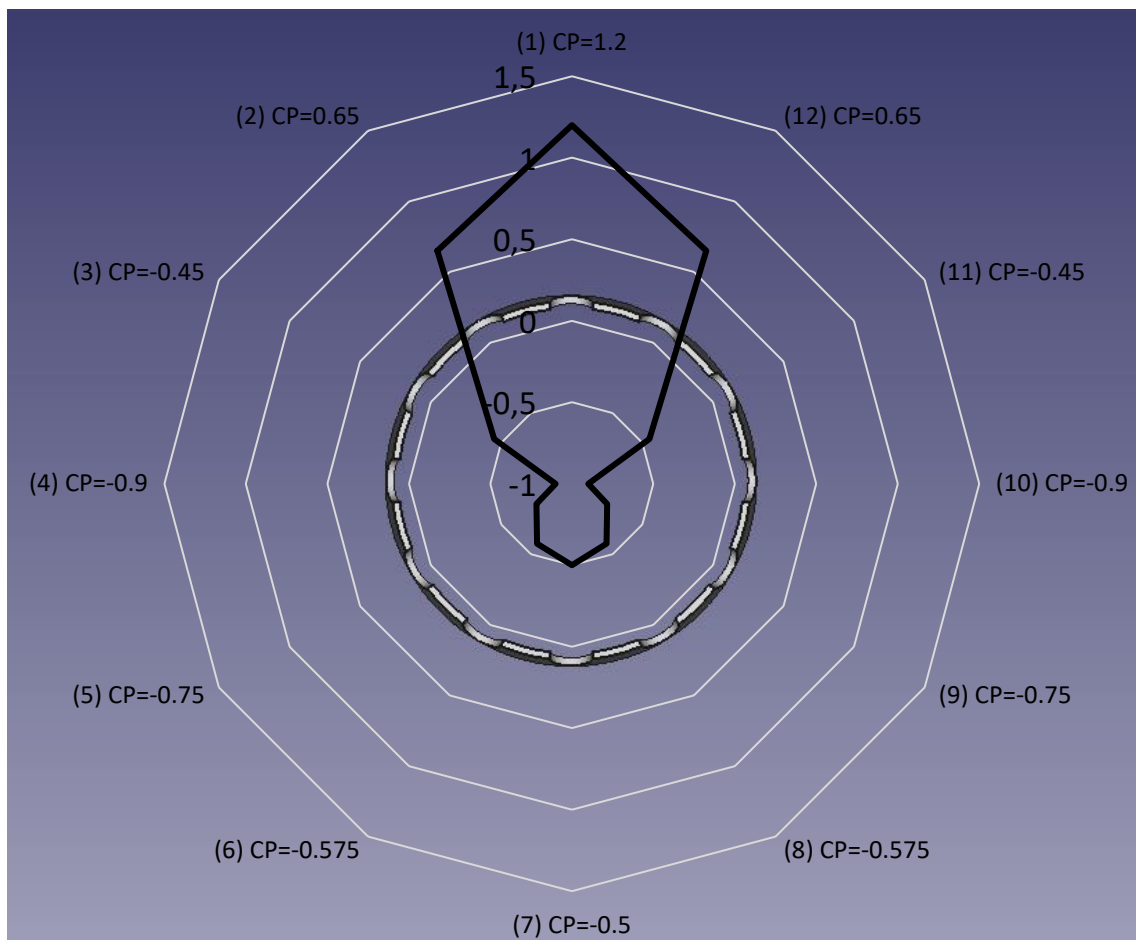


Figura 3.8: Coeficientes de pressão para cada abertura de ventilação com escala radial dos valores de CP

3.4.3 Ventiladores

Para o Caso 0, no qual será realizada uma simulação de ventilação forçada, é necessário a modelação da curva do ventilador, sendo estes 12 e todos iguais.

3.4.3.1 Modelação da Curva do Ventilador

Para a modelação da curva do ventilador, teve-se por base a documentação técnica dos ventiladores em Anexo C, Figura 3.9.

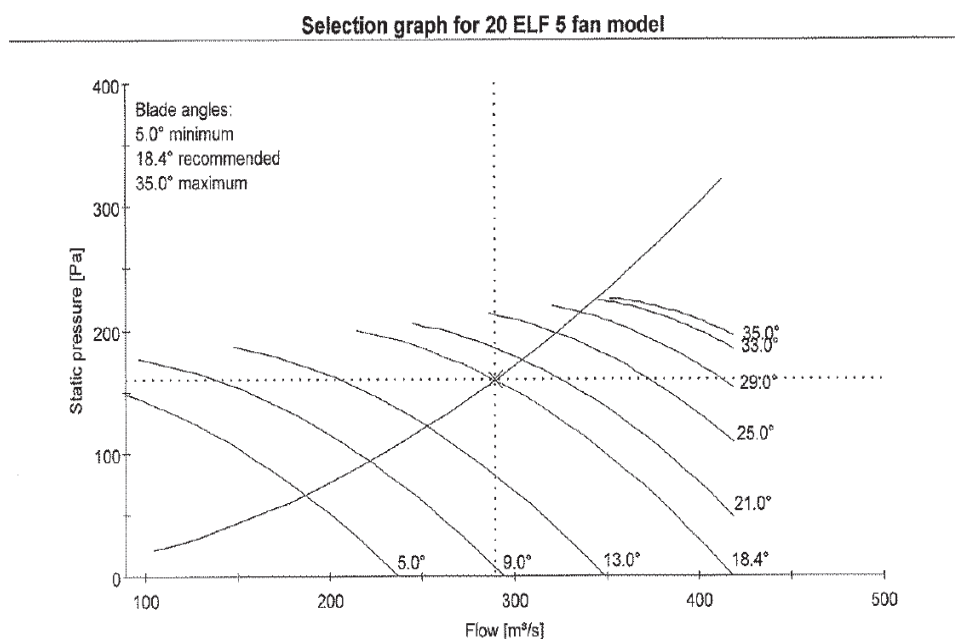


Figura 3.9: Curvas do ventilador, retirados da documentação técnica em Anexo C, a velocidade de 150 RPM e diferentes ângulos de pá

Partindo da curva com o ângulo das pás a 18.4°, sendo esta a presente no caso de estudo, fez-se uma interpolação para o polinómio de grau 2. Para tal, foi necessário replicar a curva para uma folha de cálculo e interpolar com diferentes aproximações a fim de se encontrar a que melhor se ajusta à curva do ventilador. A Figura 3.10 representa os pontos retirados do gráfico e a Tabela 3.5 os valores dos respetivos pontos.

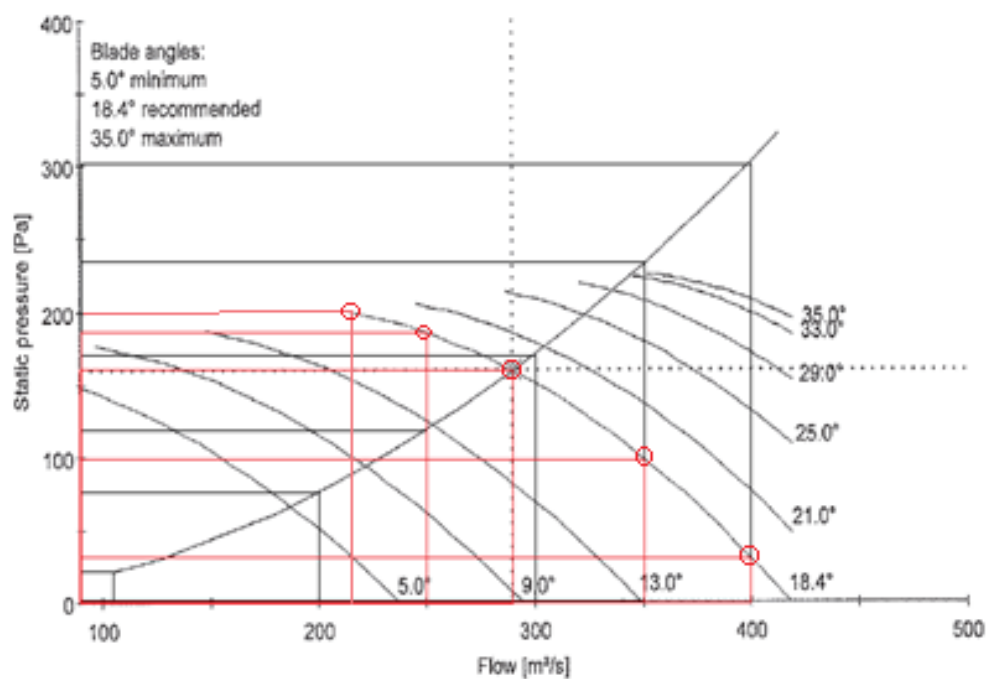


Figura 3.10: Gráfico do ventilador com representação dos pontos da curva

Tabela 3.5: Valores retirados da Curva do ventilador

P (Pa)	Q (m^3/s)
30	400
100	350
154	280
187	250
200	215

Através dos pontos retirados, Tabela 3.5, foi feita a interpolação com várias aproximações à curva do ventilador, presentes na Figura 3.11.

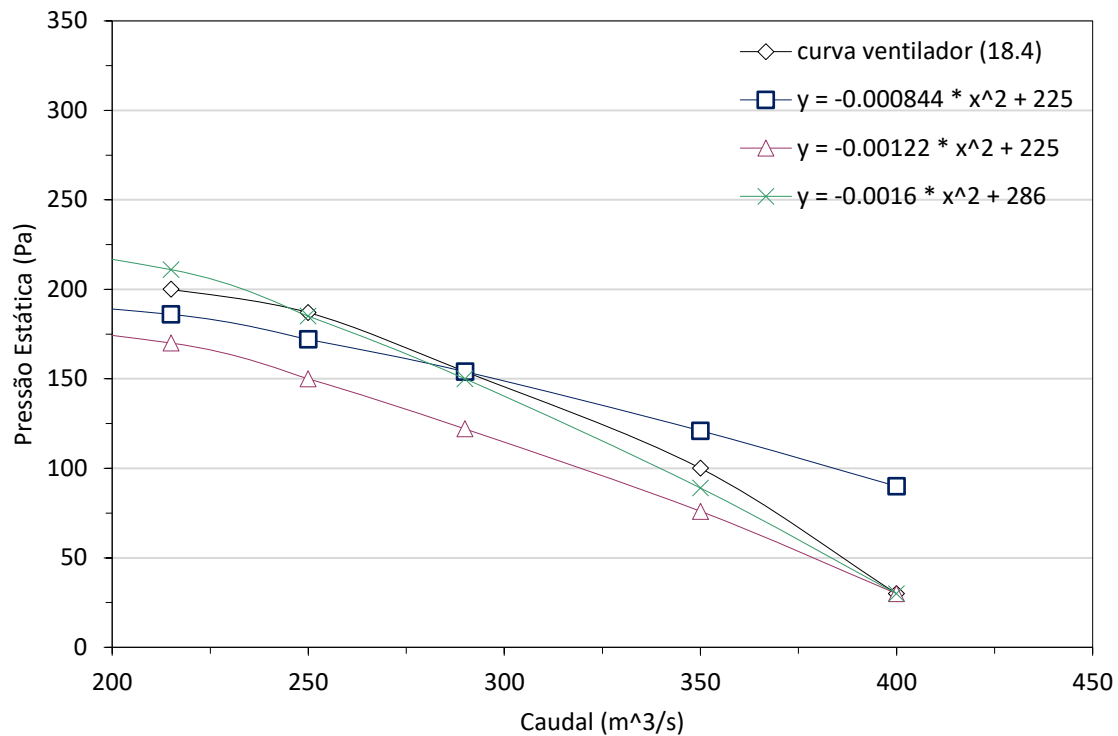


Figura 3.11: Polinômios de grau 2 interpoladores da curva do ventilador

Observando a Figura 3.11 verifica-se que a curva que melhor interpola a do ventilador está representada na seguinte equação:

$$P = -0.0016Q^2 + 286 \text{ [Pa]}$$

Sendo a área varrida pelo ventilador igual a 29.2 m^2 , vem:

$$P = -1.364v^2 + 286 \text{ [Pa]}$$

3.4.4 Paredes

Com o intuito de estudar a relevância das perdas térmicas pelas paredes para os casos em estudo, é necessário o cálculo do coeficiente global de transmissão térmica para cada uma das duas paredes. Sendo estas duas, com valores de espessura iguais a 0.4 m , uma no espaço interno (1) e outra no espaço interno (2) com as respectivas áreas para o Caso 0 presentes na Tabela 3.2.

3.4.4.1 Coeficiente Global de Transmissão de Calor das Paredes

Para o cálculo do coeficiente global de transmissão de calor das paredes, foi verificado que a espessura das mesmas tem valor relativamente pequeno comparado com o do

diâmetro interno da torre, então, considerou-se que estas comportam-se como paredes planas e não curvas [14].

O cálculo do coeficiente quando os elementos da parede estão em série é,

$$U_p = \frac{1}{R_{si} + \sum_{j=1}^n R_j + R_{se}} = \frac{1}{R_p} \quad (3.2)$$

Com recurso ao ITE50[13] foram retirados os valores das resistências térmicas superficiais, sendo estas iguais, considerando que as condições no interior e exterior da torre são as mesmas e o sentido de fluxo de calor horizontal,

$$R_{se} = R_{si} = 0.04 [(m^2 \times ^\circ C)/W]$$

Foi considerado betão armado com percentagem de armadura >2% para o material da parede, com valor de condutividade térmica de (Quadro 1.2, [13]),

$$\lambda = 2.5 [W/(m \times ^\circ C)]$$

Sendo o valor da espessura da parede de 0.4 m temos,

$$U_p = \frac{1}{0.04 + \frac{0.4}{2.5} + 0.04} = 4.17 [W/(m^2 \times ^\circ C)]$$

3.4.5 Fonte de Calor

Através da documentação em Anexo D foi atribuído o valor de 237179000 W para a carga térmica presente no espaço interno (1) que representa o calor libertado pela água na região entre a base da torre e a de enchimento da mesma.

3.5 Diferentes Casos para Simulação

No presente subcapítulo pretende-se caracterizar todos os casos, agrupando-os em conjuntos de comparação de resultados, que iram ser simulados e no capítulo seguinte discutidos. De salientar que para efeitos de comparação todos os casos aqui referidos têm valores constantes dos diâmetros da base da torre, abertura entre espaços 1 e 2 (abertura 13-17) e saída no topo da torre (abertura 18), ou seja, D1, D2 e D3 respetivamente.

Caso 0 de Ventilação Forçada e Natural com e sem Fonte de Calor

Para este conjunto de simulações será considerado para o Caso 0:

- Ventilação Forçada (Caso 0 Forçado)
 - Dimensões Estrutura - Figura 3.3 e Tabela 3.1;

- Dimensões Espaços Internos - Tabela 3.2;
 - Aberturas de Ventilação - caracterizadas pela curva do ventilador descrita no subcapítulo anterior a uma velocidade de 150 RPM, com respectivas áreas na Tabela 3.3;
 - Paredes - Adiabáticas;
 - Temperatura do Ar Exterior - 15°C;
 - Velocidade do Vento Exterior - variável, entre 0-15 m/s.
- Ventilação Natural (Caso 0 Natural)
 - Dimensões Estrutura - Figura 3.3 e Tabela 3.1;
 - Dimensões Espaços Internos - Tabela 3.2;
 - Aberturas de Ventilação - Tabela 3.3;
 - Paredes - Adiabáticas;
 - Temperatura do Ar Exterior - 15°C;
 - Velocidade do Vento Exterior - variável, entre 0-15 m/s.

Para ambos os casos serão realizados dois conjuntos de simulações, um sem fonte de calor no interior da torre e outro contendo a fonte de calor de 237179000 W no espaço interno (1).

Coeficiente Global de Transmissão de Calor

Serão realizados os mesmos conjuntos de simulações referidos anteriormente, no entanto, com a existência do coeficiente global de transmissão de calor nas respectivas paredes com valores calculados no subcapítulo anterior. Na Tabela 3.2 encontram-se os valores das respectivas áreas de cada parede para ambos os espaços, A_p .

Caso 0 com Diferentes Alturas de Torre

Os Casos 1, 2 e 3 têm por base o Caso 0 de Ventilação Natural com coeficiente global de transmissão de calor das paredes. Estes Casos têm as seguintes características:

- Ventilação Natural (Casos 1, 2 e 3)
 - Dimensões Estrutura - Figura 3.12 e Tabela 3.6 (com base na Figura 3.3);
 - Dimensões Espaços Internos - Tabela 3.7;
 - Aberturas de Ventilação - valores das áreas na Tabela 3.6 e valores dos coeficientes de pressão e de perda de carga na Tabela 3.3;
 - Paredes - com coeficiente global de transmissão de calor, com respectivas áreas na Tabela 3.6;

- Temperatura do Ar Exterior - 15°C;
- Velocidade do Vento Exterior - variável, entre 0-15 m/s;
- Fonte de Calor Espaço (1) - 237179000 W.

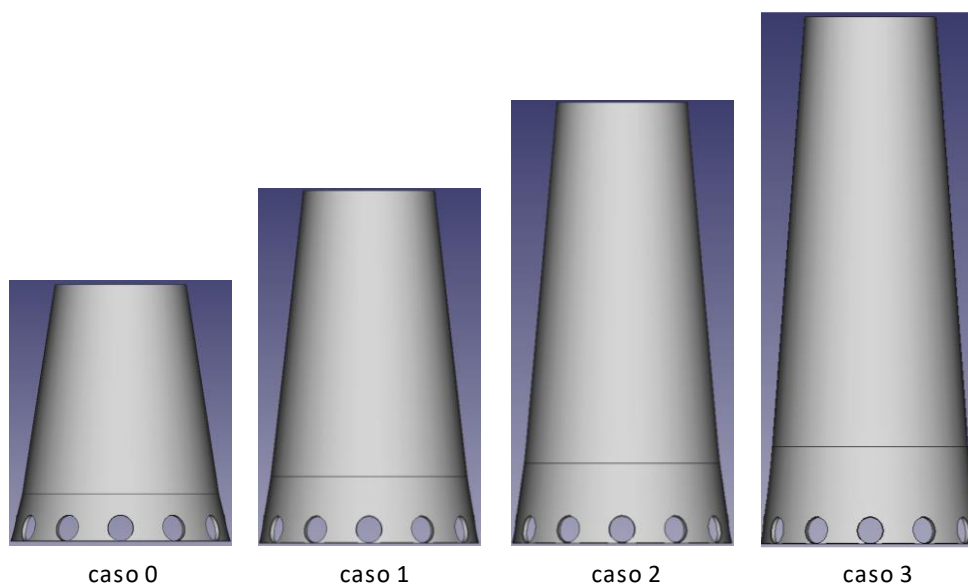


Figura 3.12: Ilustração dos Casos 1, 2 e 3

Tabela 3.6: Dimensões da estrutura para os Casos 1, 2 e 3

Dimensões Estrutura	H_{total} (m)	$H1$ (m)	$H2$ (m)	$D1$ (m)	$D2$ (m)	$D3$ (m)	D_V (m)
Caso 1	80	15	65	29.5	45	50.3	6.1
Caso 2	100	18	82	29.5	45	50.3	6.1
Caso 3	120	22	98	29.5	45	50.3	6.1

Tabela 3.7: Constantes de cada um dos espaços internos para os Casos 1, 2 e 3

Dimensões Espaços Internos	Espaço (1)				Espaço (2)			
	Volume (m^3)	A_{planta} (m^2)	A_p (m^2)	H_k (m)	Volume (m^3)	A_{planta} (m^2)	A_p (m^2)	H_k (m)
Caso 1	26777	1987.1	1930	11.95	71858	1590.4	7660	65
Caso 2	32132	1987.1	2373	14.95	90652	1590.4	9639	82
Caso 3	39272	1987.1	2967	18.95	108340	1590.4	11504	98

Caso 0 com Aberturas 12x6 e Diferentes Alturas de Torre

Os Casos 4, 5, 6, 7, 8 e 9 têm igualmente como base o Caso 0 de Ventilação Natural com coeficiente global de transmissão de calor das paredes. Estes Casos têm as seguintes características:

- Ventilação Natural (Casos 4, 5, 6, 7, 8 e 9)
 - Dimensões Estrutura - Figura 3.13 e Tabela 3.8 (com base na Figura 3.3);
 - Dimensões Espaços Internos - Tabela 3.9;
 - Aberturas de Ventilação - valores das áreas na Tabela 3.8 e valores dos coeficientes de pressão e de perda localizada na Tabela 3.3;
 - Paredes - com coeficiente global de transmissão de calor, com respectivas áreas na Tabela 3.9;
 - Temperatura do Ar Exterior - 15°C;
 - Velocidade do Vento Exterior - variável, entre 0-15 m/s;
 - Fonte de Calor Espaço (1) - 237179000 W.

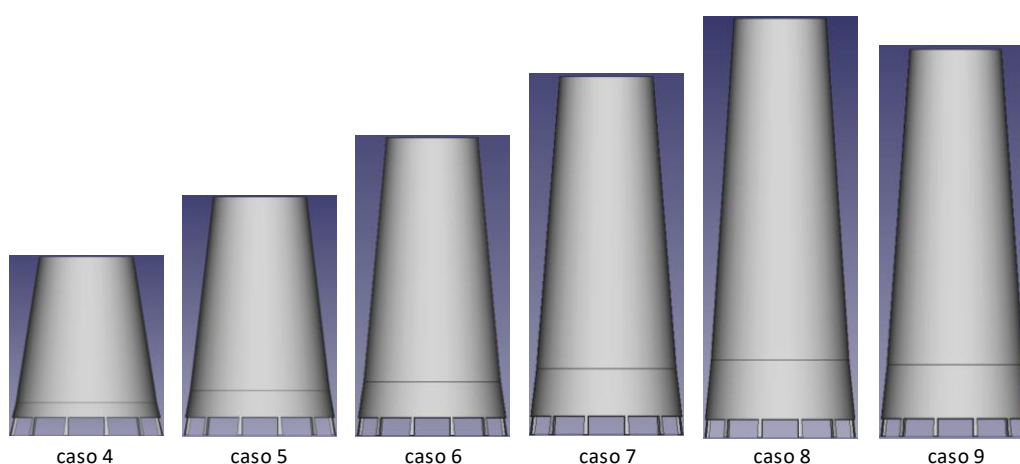


Figura 3.13: Ilustração dos Casos 4, 5, 6, 7, 8 e 9

Tabela 3.8: Dimensões da estrutura para os Casos 4, 5, 6, 7, 8 e 9

Dimensões Estrutura	H_{total} (m)	$H1$ (m)	$H2$ (m)	$D1$ (m)	$D2$ (m)	$D3$ (m)	A_v (m ²)
Caso 4	60	11	49	29.5	45	50.3	72
Caso 5	80	15	65	29.5	45	50.3	72
Caso 6	100	18	82	29.5	45	50.3	72
Caso 7	120	22	98	29.5	45	50.3	72
Caso 8	140	26	114	29.5	45	50.3	72
Caso 9	130	24	106	29.5	45	50.3	72

Tabela 3.9: Constantes de cada um dos espaços internos para os Casos 4, 5, 6, 7, 8 e 9

Dimensões Espaços Internos	Espaço (1)				Espaço (2)			
	<i>Volume</i> (m^3)	<i>A_{planta}</i> (m^2)	<i>A_p</i> (m^2)	<i>H_k</i> (m)	<i>Volume</i> (m^3)	<i>A_{planta}</i> (m^2)	<i>A_p</i> (m^2)	<i>H_k</i> (m)
Caso 4	19636	1987.1	830	8	54170	1590.4	5805	49
Caso 5	26777	1987.1	1416	12	71858	1590.4	7660	65
Caso 6	32132	1987.1	1860	15	90652	1590.4	9639	82
Caso 7	39272	1987.1	2453	19	108340	1590.4	11504	98
Caso 8	46413	1987.1	3048	23	126029	1590.4	13372	114
Caso 9	42842	1987.1	2751	21	117184	1590.4	12438	106

Caso 9 com Aberturas de Diferentes Dimensões

Os Casos 10, 11, 12 e 13 têm como base o Caso 9. Estes Casos têm as seguintes características:

- Ventilação Natural (Casos 10, 11, 12 e 13)
 - Dimensões Estrutura - Figura 3.14 e Tabela 3.10;
 - Dimensões Espaços Internos - Tabela 3.11;
 - Aberturas de Ventilação - valores das áreas na Tabela 3.10 e valores dos coeficientes de pressão e de perda localizada na Tabela 3.3;
 - Paredes - com coeficiente global de transmissão de calor, com respectivas áreas na Tabela 3.11;
 - Temperatura do Ar Exterior - 15°C;
 - Velocidade do Vento Exterior - variável, entre 0-15 m/s;
 - Fonte de Calor Espaço (1) - 237179000 W.

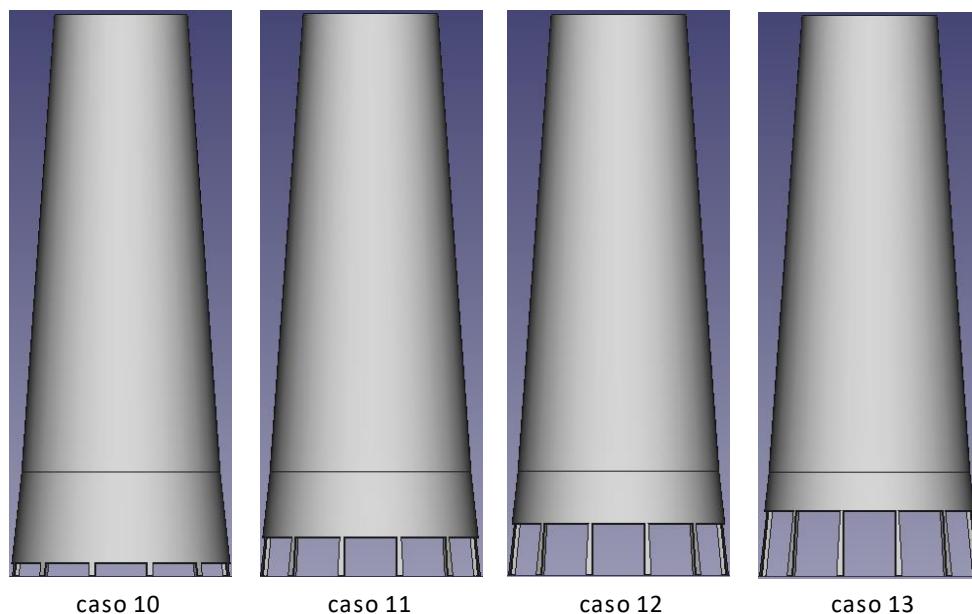


Figura 3.14: Ilustração dos Casos 10, 11, 12 e 13

Tabela 3.10: Dimensões da estrutura para os Casos 10, 11, 12 e 13

Dimensões Estrutura	H_{total} (m)	$H1$ (m)	$H2$ (m)	$D1$ (m)	$D2$ (m)	$D3$ (m)	A_v (m ²)
Caso 10	130	24	106	29.5	45	50.3	72
Caso 11	130	24	106	29.5	45	50.3	36
Caso 12	130	24	106	29.5	45	50.3	108
Caso 13	130	24	106	29.5	45	50.3	144

Tabela 3.11: Constantes de cada um dos espaços internos para os Casos 10, 11, 12 e 13

Dimensões	<i>Espaço (1)</i>				<i>Espaço (2)</i>			
Espaços Internos	<i>Volume</i> (m ³)	A_{planta} (m ²)	A_p (m ²)	H_k (m)	<i>Volume</i> (m ³)	A_{planta} (m ²)	A_{parede} (m ²)	H_k (m)
Caso 10	42842	1987.1	2751	22,5	117184	1590.4	12438	106
Caso 11	42842	1987.1	3183	19,5	117184	1590.4	12438	106
Caso 12	42842	1987.1	2319	18	117184	1590.4	12438	106
Caso 13	42842	1987.1	1887	16,5	117184	1590.4	12438	106

4

ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Introdução

Para todos os casos analisados no presente capítulo, foram consideradas, para efeitos de comparação e uniformidade, valores constantes das áreas da base da torre, abertura intermédia (13-17) e abertura de saída da chaminé (18).

Foi ainda considerado o coeficiente global de transmissão térmica nas paredes dos respetivos espaços (parede não adiabática, PNA) para todos os casos simulados, analisados e comparados a partir do subcapítulo 4.4.

Foi simulado o Caso 0 com Ventilação Forçada, Figura 4.1, sem fonte de calor no espaço interno (1) e paredes não adiabáticas, de maneira a verificar que o caudal de ar imposto pelos ventiladores com equação caracterizada no subcapítulo 3.4.3.1 é igual aos valores medidos no subcapítulo 3.4.2.1. Para tal, foram comparadas as velocidades na abertura intermédia (13-17) e abertura de saída da chaminé (18) em ambos os casos, com resultados na Tabela 4.1.

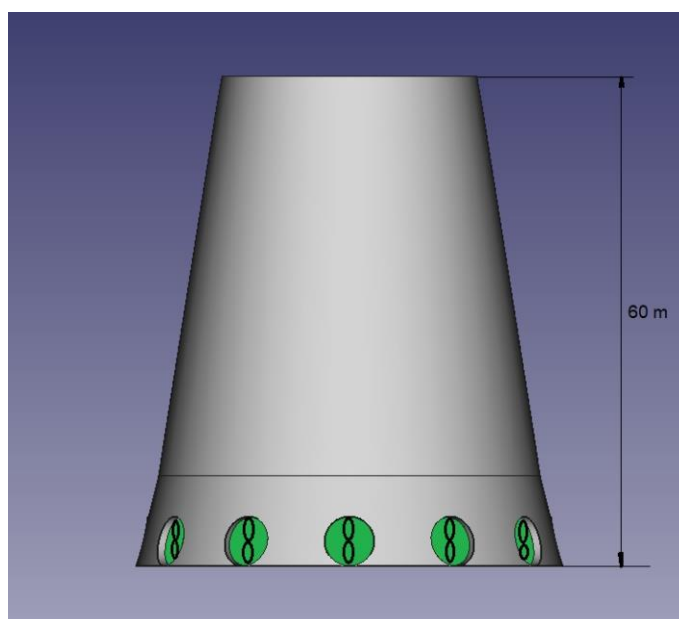


Figura 4.1: Caso 0 com Ventilação Forçada

Tabela 4.1: Velocidades nas aberturas do Caso 0 simulado e Caso 0 medido

Abertura, k	Caso 0 Simulado	Caso 0 Medido	Desvio
	U_k (m/s)	U_k (m/s)	
13-17	2.1751	2.1	3.45%
18	5.0611	4.9	3.18%

4.2 Caso 0 de Ventilação Forçada e Natural com e sem Fonte de Calor

Para o primeiro conjunto de resultados, foram realizados 4 conjuntos de simulações partindo do Caso 0, dois de ventilação forçada e dois de ventilação natural, onde se fez variar os valores da carga térmica presente no espaço interno (1), $Q_1 = 0 \text{ W}$ e $Q_1 = 237179000 \text{ W}$, com paredes adiabáticas, Figura 4.2.

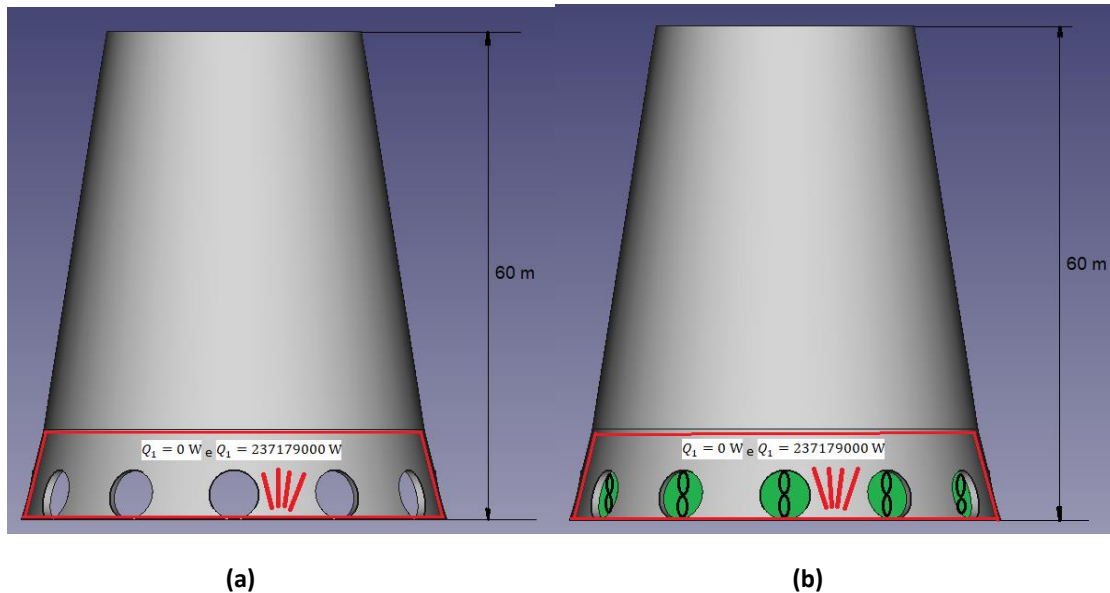


Figura 4.2: Ilustração do Caso 0 para comparação de: (a) ventilação natural; (b) ventilação forçada

Analisando os resultados obtidos, observa-se que:

Na figura 4.3 (a), sem fonte de calor no espaço interno (1), o número de Rph é diretamente proporcional à velocidade do vento exterior, e para o caso com fonte de calor no mesmo espaço, observa-se um aumento no número Rph devido ao efeito da impulsão térmica, no entanto com uma menor amplitude. Na Figura 4.3 (b), no caso de ventilação forçada, verifica-se que os ventiladores, sendo de alta pressão, são responsáveis pela imposição do caudal na torre, obstruindo o efeito do vento exterior, sendo este visível para valores de $U_0 > 9 \text{ (m/s)}$;

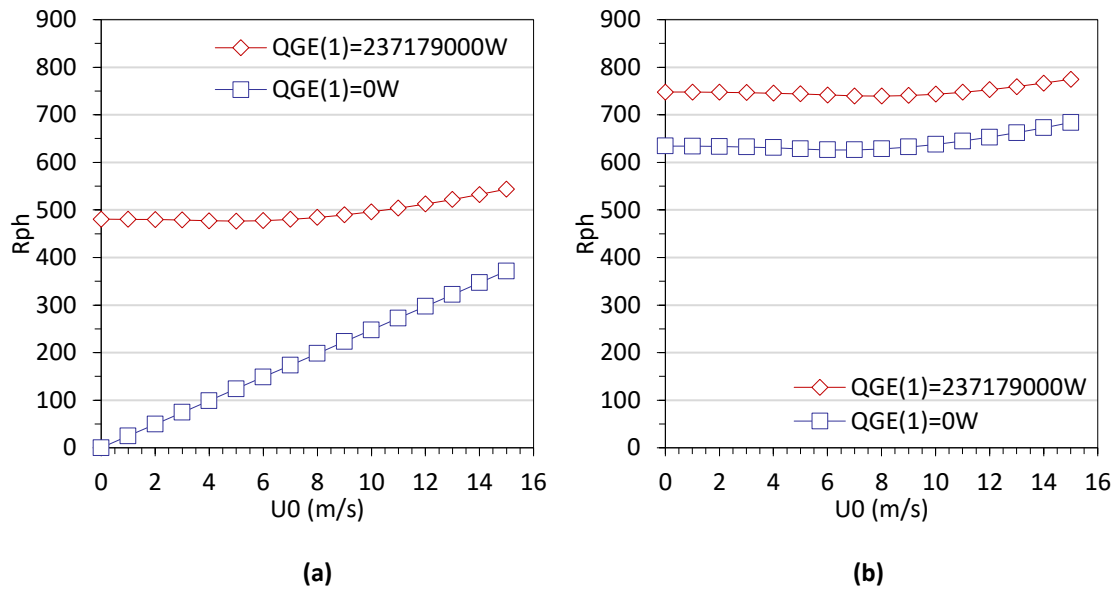


Figura 4.3: Rph no espaço interno (1) para o Caso 0 com e sem fonte de calor: (a) Ventilação Natural; (b) Ventilação Forçada

No que diz respeito às Variações de Temperatura nos dois espaços, espaço interno (1) representado na Figura 4.4, estas apresentam um comportamento idêntico, e por sua vez um decréscimo nos valores da variação, a par do aumento do caudal de ar verificado na Figura 4.3 e o aumento da velocidade do vento exterior.

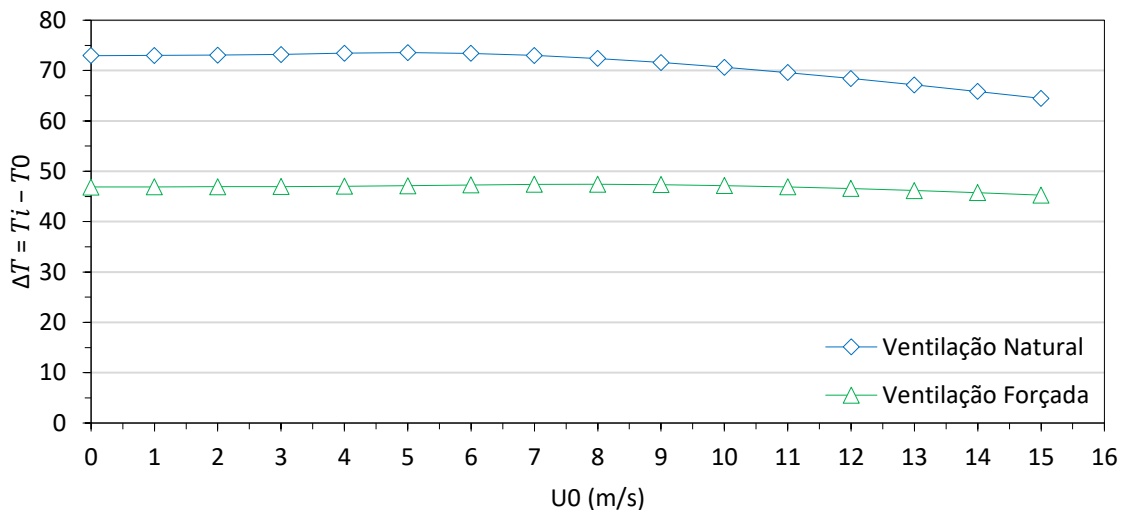


Figura 4.4: Variação da Temperatura com $Q_1 = 237179000$ W para o Caso 0 de Ventilação Forçada e Natural

4.3 Coeficiente Global de Transmissão de Calor

Com o intuito de verificar qual o impacto da transmissão térmica pelas paredes, foram realizados 4 conjuntos de simulações para comparação, Caso 0 de ventilação forçada e Caso 0 de ventilação natural, ambos com paredes adiabáticas e paredes não adiabáticas.

A Figura 4.5 apresenta as Rph no espaço interno (1) do Caso 0 de ventilação natural simulado com e sem coeficiente de transmissão de calor nas paredes. A Figura 4.6, por sua vez, apresenta as Rph no espaço interno (1) para o Caso 0 de ventilação forçada.

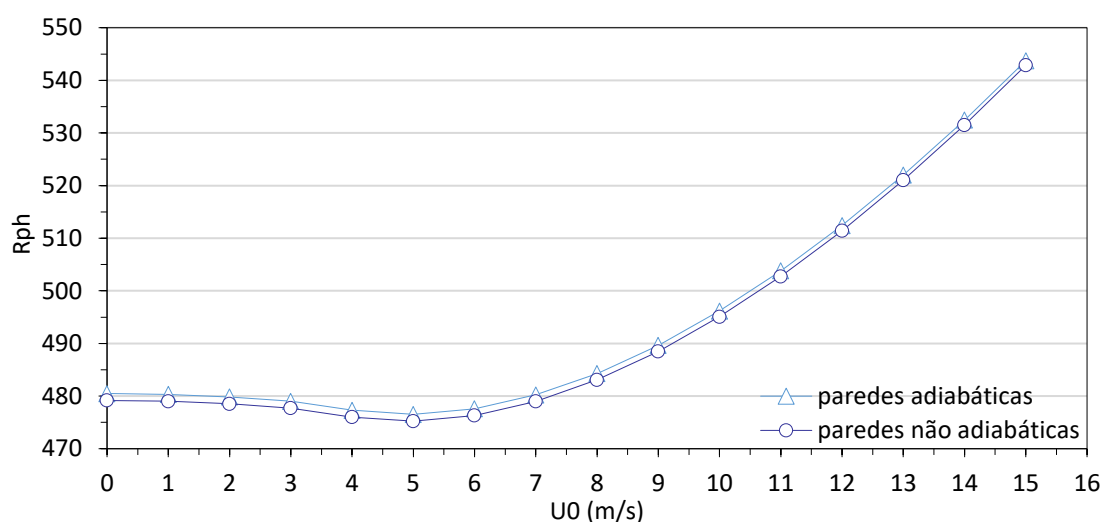


Figura 4.5: Caso 0 de ventilação natural com paredes adiabáticas e paredes não adiabáticas

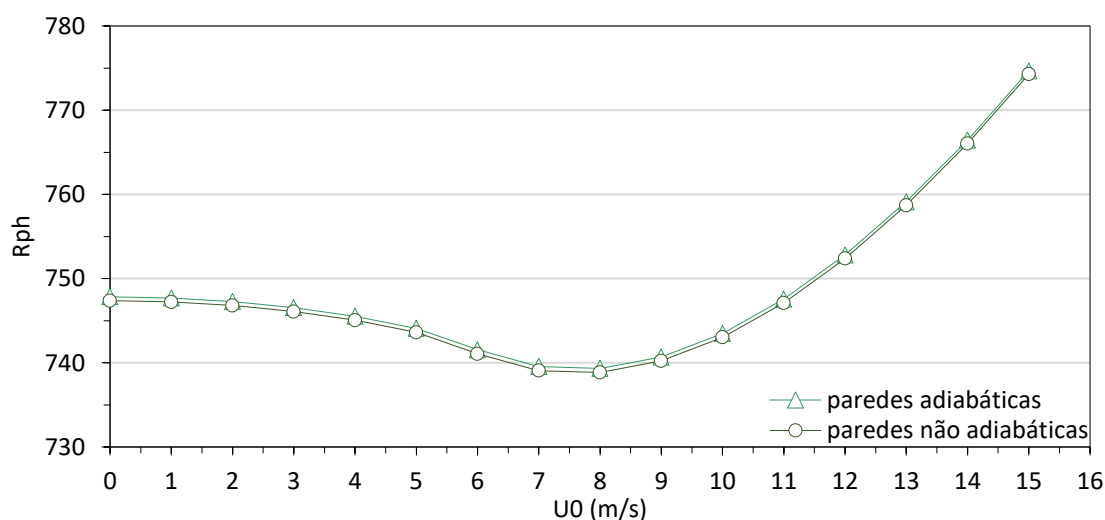


Figura 4.6: Caso 0 de ventilação forçada com paredes adiabáticas e paredes não adiabáticas

Para melhor compreensão, a Figura 4.7 compara a diferença entre os valores das Rph no espaço interno (1) de paredes adiabáticas (PA) e de paredes não adiabáticas (PNA) em ambos os casos.

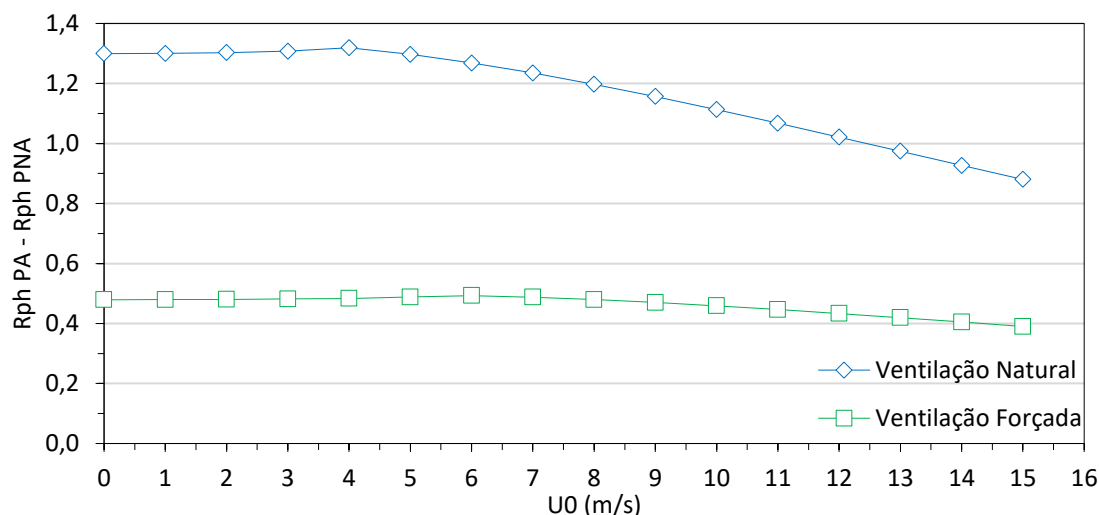


Figura 4.7: Diferença das Rph do espaço interno (1) para o Caso 0 com paredes adiabáticas e paredes não adiabáticas

Observando as figuras anteriores verifica-se, em ambos os casos, uma variação desprezável dos valores de Rph no espaço interno (1), no entanto, observa-se uma menor diferença de valores quando o caudal é superior, caso com Ventilação Forçada, e uma diminuição da diferença com o aumento da velocidade de ar exterior, que por sua vez introduz energia no sistema, Figura 4.7. O mesmo se verifica para a variação da temperatura em ambos os casos.

Como seria de esperar, ao perder calor por condução, vamos ter uma temperatura superior nos espaços internos devido à diminuição do caudal.

Para os próximos subcapítulos todos os casos simulados terão o coeficiente global de transmissão térmica nas respetivas paredes e a fonte de calor no espaço interno (1), $Q_1 = 237179000 \text{ W}$, para efeitos de comparação e uniformidade de análise de resultados.

4.4 Caso 0 com Diferentes Alturas de Torre

Foram realizados casos para simulação com o intuito de verificar do ponto de vista da ventilação natural qual a altura total de torre necessária para obter valores de caudal e variação da temperatura no espaço interno (1), idênticos aos do Caso 0 de ventilação forçada, caso de referência. Para os diferentes casos foram mantidas as dimensões das áreas das aberturas de ventilação do Caso 0 e a fonte de calor no espaço interno (1). As alturas de torre distam entre si em 20 m e as alturas referentes a cada espaço interior aumentam linearmente com o aumento da altura da torre, como caracterizado no capítulo anterior e na Figura 4.8.

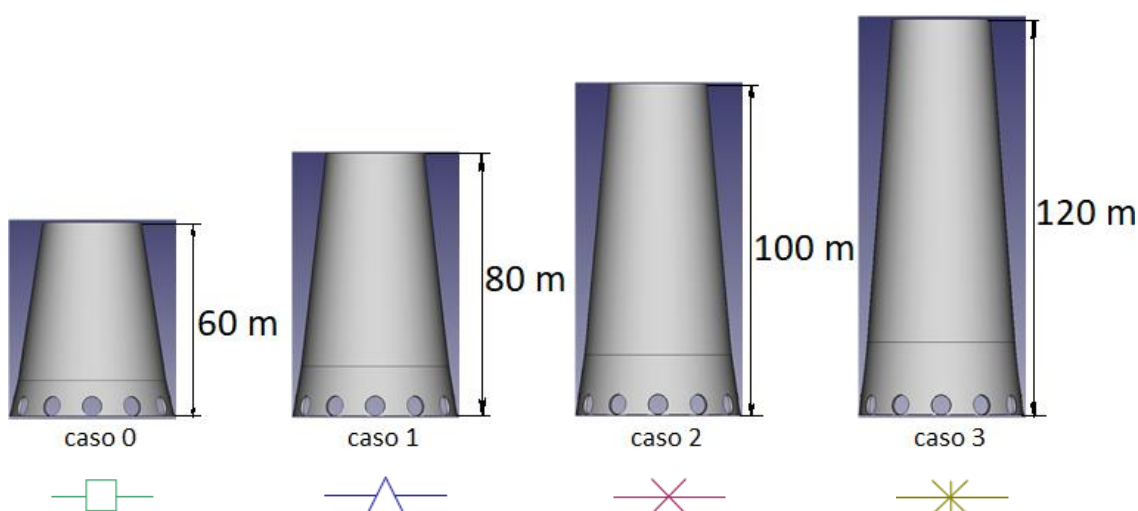


Figura 4.8: Ilustração do Caso 0, Caso 1, Caso 2 e Caso 3 de ventilação natural com respectivas alturas de torre

Analisando os resultados obtidos, observa-se que:

Na figura 4.9 o número de Rph aumenta com o aumento da velocidade do vento, no entanto, devido ao volume dos espaços internos dos diferentes casos 1, 2 e 3 ser sucessivamente maior, os valores de Rph são sucessivamente menores. Este parâmetro não serve assim como termo de comparação dos caudais. Assim, uma vez que D1, D2 e D3 são constantes nos diferentes casos, foi analisada a velocidade à saída da chaminé uma vez que esta será assim proporcional ao caudal que atravessa a Torre;

As velocidades nas aberturas de ventilação aumentam com o aumento da altura de torre, efeito esse justificado pelo aumento da altura característica dos espaços internos, H_k , que por sua vez aumenta o efeito de impulsão térmica e o caudal, Figura 4.10;

Para a variação da Temperatura, $\Delta T = T_i - T_o$, nos dois espaços, espaço interno (1) representado na Figura 4.11, estas apresentam um comportamento idêntico e por sua vez uma diminuição nos valores da variação, a par do aumento do caudal de ar

observado na Figura 4.10 e do aumento da velocidade do vento exterior, como seria de esperar.

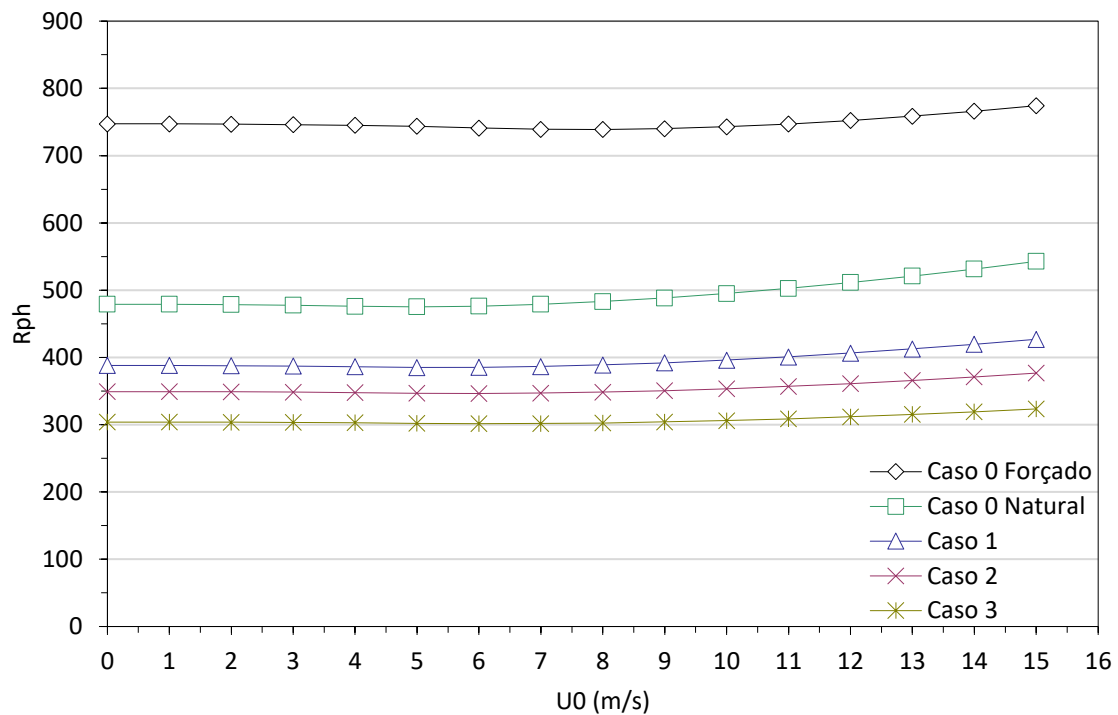


Figura 4.9: Rph no espaço interno (1) com $Q_1 = 237179000$ W para o Caso 0 com diferentes alturas de torre

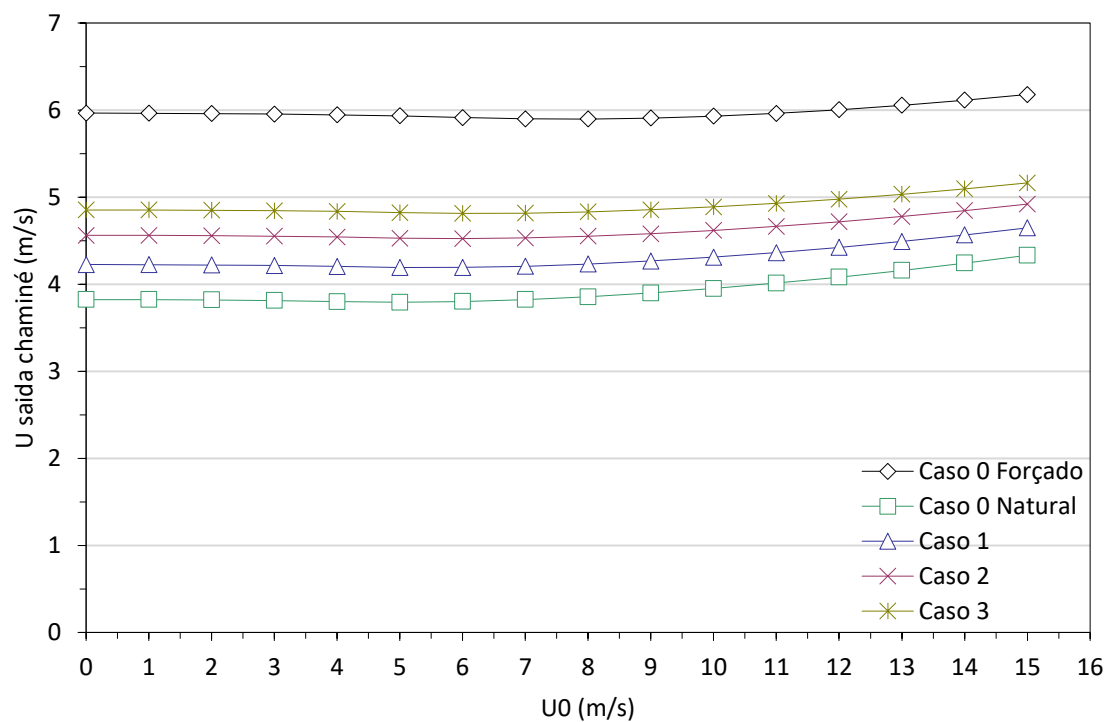


Figura 4.10: Velocidade à saída da chaminé com $Q_1 = 237179000$ W para o Caso 0 com diferentes alturas de torre

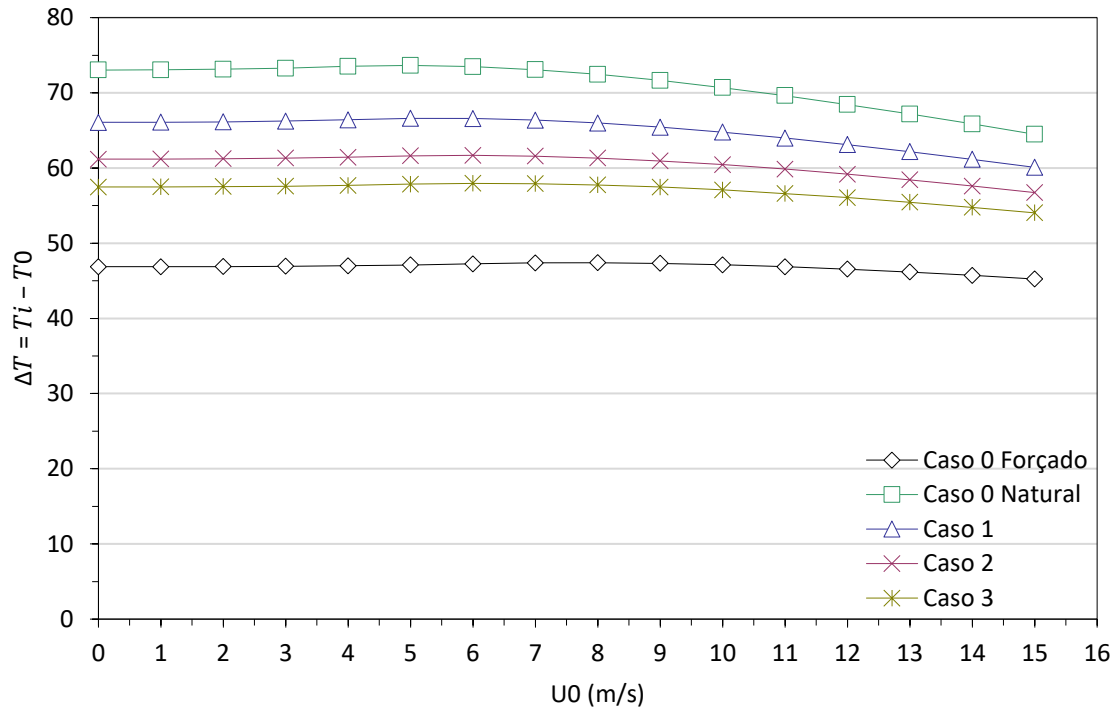


Figura 4.11: Variação da Temperatura no espaço interno (1) com $Q_1 = 237179000$ W para o Caso 0 com diferentes alturas de torre

4.5 Caso 0 com Aberturas 12x6 e Diferentes Alturas de Torre

No seguimento do que foi analisado no subcapítulo anterior, foi realizado outro conjunto de casos com o mesmo objetivo.

Foram escolhidas áreas das aberturas de ventilação inferiores com 12 m de largura por 6 metros de altura fazendo um total de 72 m^2 , de forma a manter a altura com o mesmo valor do diâmetro das aberturas dos casos anteriores e o comprimento com distanciamento entre as mesmas com a menor superfície de parede, verificando assim comparativamente o impacto do aumento da área das aberturas nos resultados.

As alturas de torre para os diferentes casos distam entre si em 20 m, sendo que o Caso 9 dista em 10 m entre o Caso 7 e 8, as alturas referentes a cada espaço interior aumentam linearmente com o aumento da altura de torre, como caracterizado no capítulo anterior e na Figura 4.12.

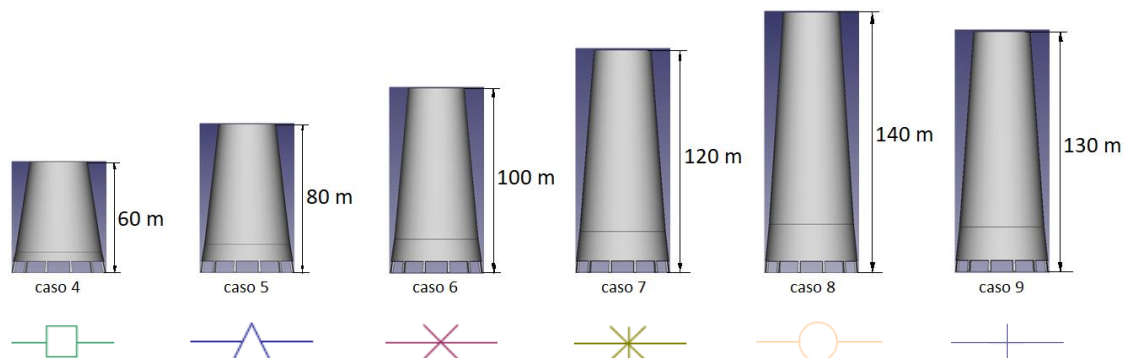


Figura 4.12: Ilustração do Caso 4, Caso 5, Caso 6, Caso 7, Caso 8 e Caso 9 de ventilação natural com respectivas alturas de torre

Analisando os resultados obtidos, observa-se que:

Na figura 4.13 o número de Rph aumenta com o aumento da velocidade do vento exterior, no entanto devido ao aumento do volume nos espaços internos estes têm valores menores de Rph, como verificado nos casos anteriores;

Para a Figura 4.14 a velocidade de saída na abertura da chaminé (18), indica que esta aumenta com o aumento da altura total de torre, efeito esse caracterizado pelo aumento da altura característica dos espaços internos, que por sua vez potencia o caudal de entrada nas aberturas de ventilação. Para os diferentes casos é ainda visível uma ligeira quebra nos valores de caudal à saída da chaminé para valores elevados do vento exterior, $U_0 > 8 \text{ (m/s)}$, o que indica o aparecimento do efeito de curto circuito, efeito esse que será estudado e revisto com maior pormenor no subcapítulo 4.7. De verificar que o Caso 9 é o que apresenta um caudal no interior da torre mais próximo do Caso 0 de Ventilação Forçada;

No que diz respeito às Variações de Temperatura nos dois espaços, espaço interno 1 representado na Figura 4.15, estas apresentam um comportamento idêntico e por sua vez um decréscimo nos valores da variação de temperatura, a par do aumento do caudal de ar verificado na Figura 4.14 resultante do aumento da velocidade do vento exterior.

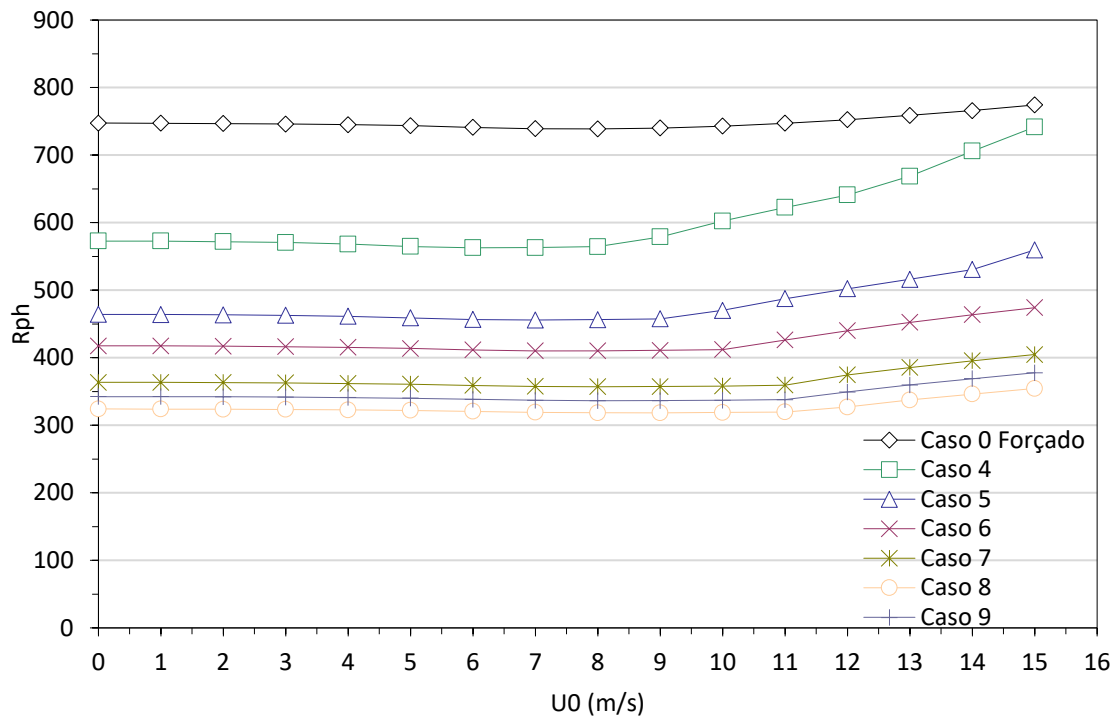


Figura 4.13: R_{ph} no espaço interno (1) com $Q_1 = 237179000$ W para aberturas 12x6 e diferentes alturas de torre

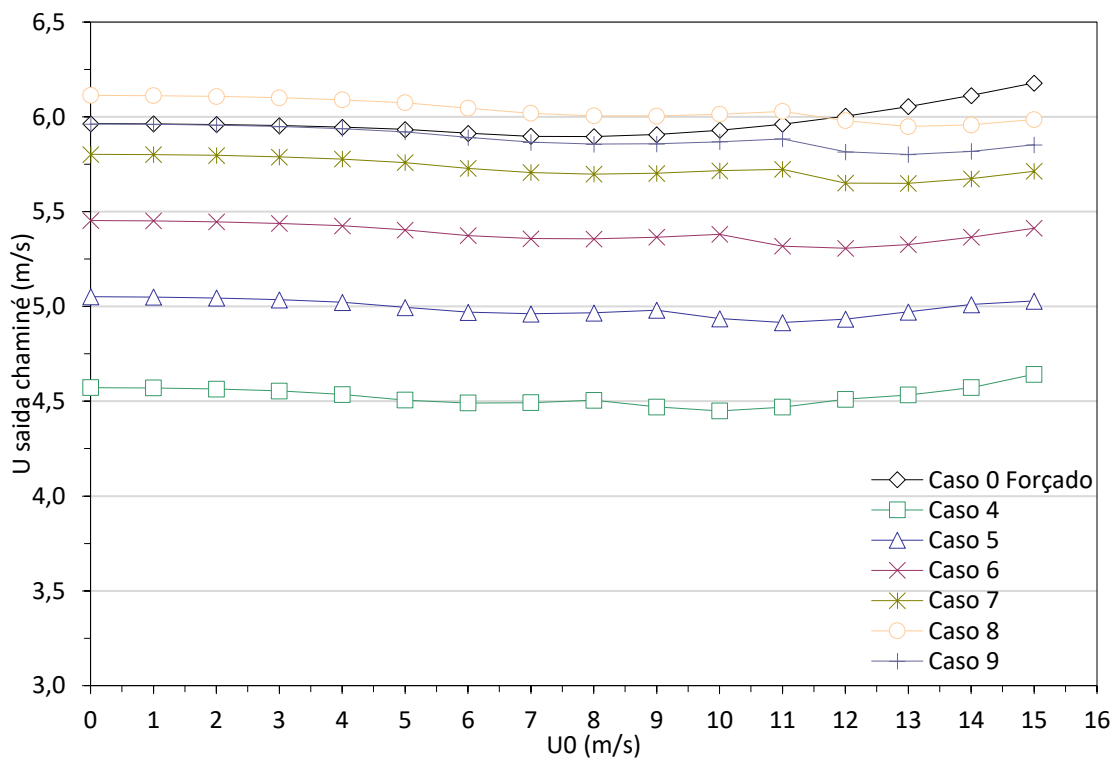


Figura 4.14: Velocidade à saída da chaminé com $Q_1 = 237179000$ W para aberturas 12x6 e diferentes alturas de torre

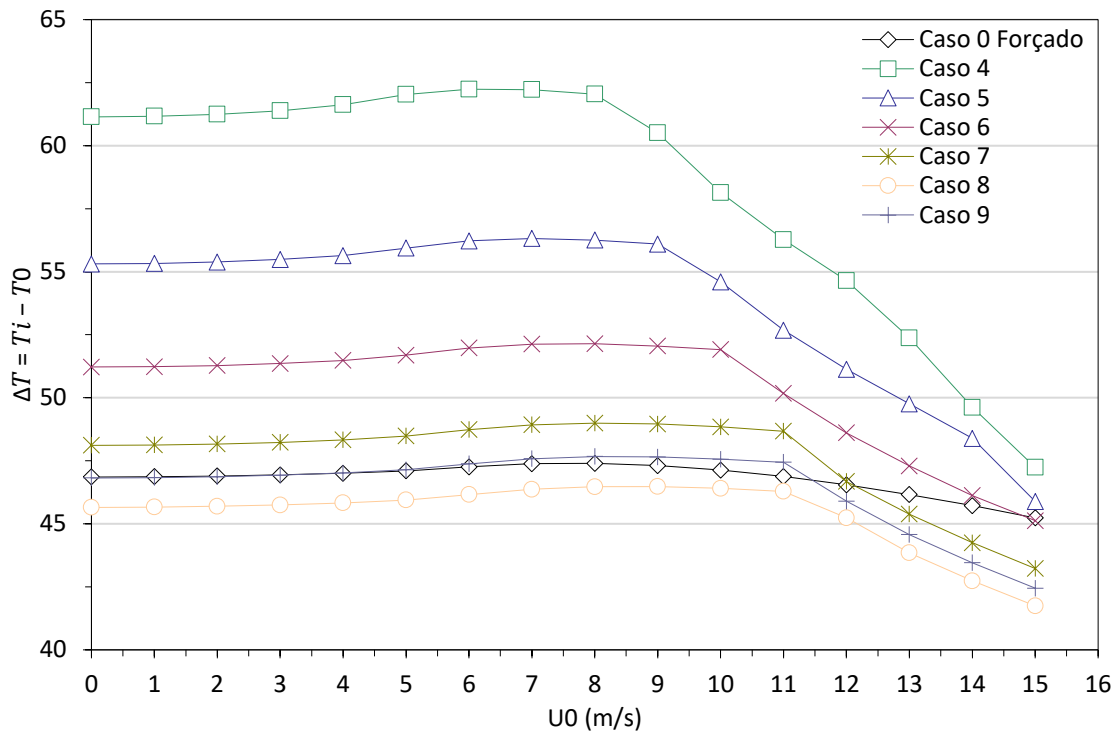


Figura 4.15: Variação da Temperatura no espaço interno (1) com $Q_1 = 237179000$ W para aberturas 12x6 e diferentes de torre

4.6 Caso 9 com Aberturas de Diferentes Dimensões

Com o intuito de verificar a relevância e impacto de diferentes áreas de aberturas de ventilação no Caso 9, devido a este ser o caso com valores de caudal e variação de temperatura mais próximos ao caso de referência, foram simulados vários casos com geometrias iguais onde apenas variam as respectivas áreas das aberturas, caracterizados no capítulo anterior e na Figura 4.16.

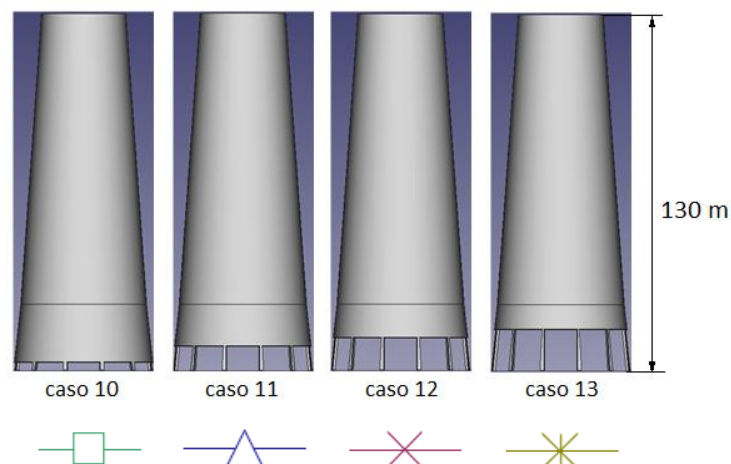


Figura 4.16: Ilustração do Caso 10, Caso 11, Caso 12 e Caso 13 de ventilação natural com respectivas alturas de torre

Analisando os resultados obtidos, observa-se que:

Na figura 4.17 o número de Rph aumenta com o aumento da velocidade do vento exterior e das áreas das aberturas, como seria esperado;

O aparecimento do efeito de curto circuito deve-se ao aumento da velocidade do vento e da área das aberturas inferiores que por sua vez, dá origem a uma diminuição da velocidade à saída da chaminé (18), efeito esse observado na Figura 4.18 para valores de $U_0 > 4$ (m/s) (o ar entra e sai pelas aberturas inferiores do espaço interno (1));

No que diz respeito às Variações de Temperatura nos dois espaços, espaço interno (1) representado na Figura 4.19, estas apresentam um comportamento idêntico e por sua vez um decréscimo nos valores da variação, a par do aumento do caudal de ar no espaço interno (1) devido ao aumento das áreas das aberturas de ventilação e aumento da velocidade do vento exterior.

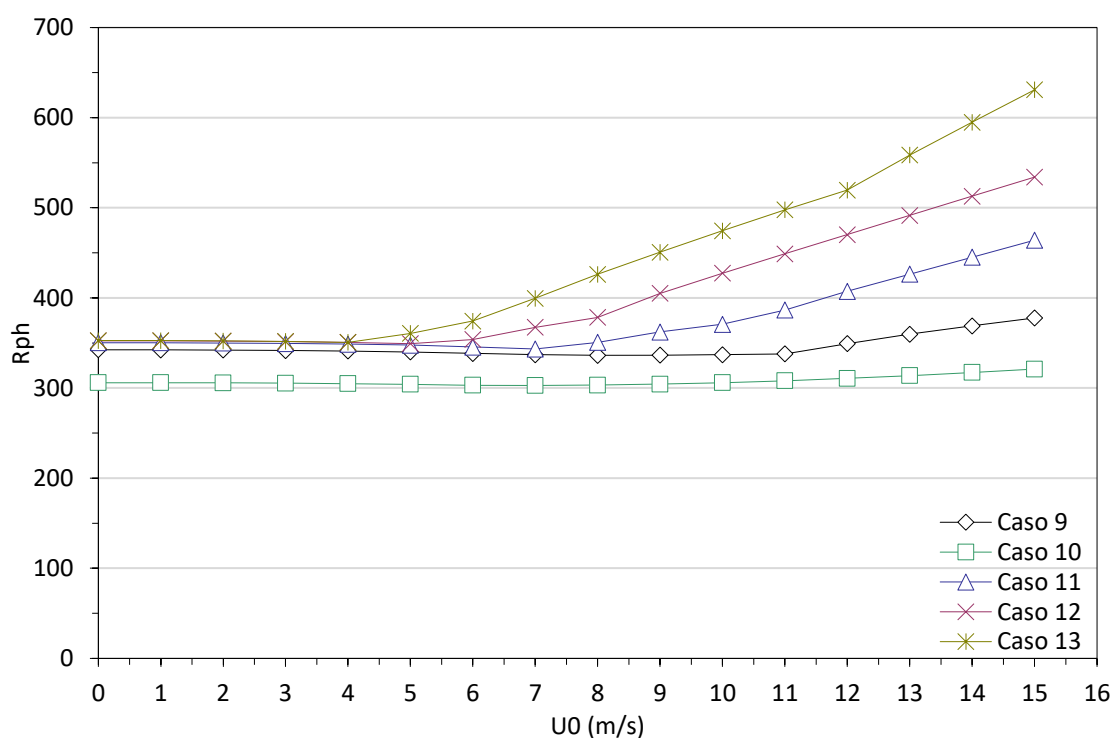


Figura 4.17: Rph no espaço interno (1) com $Q_1 = 237179000$ W para casos com diferentes áreas de aberturas de ventilação

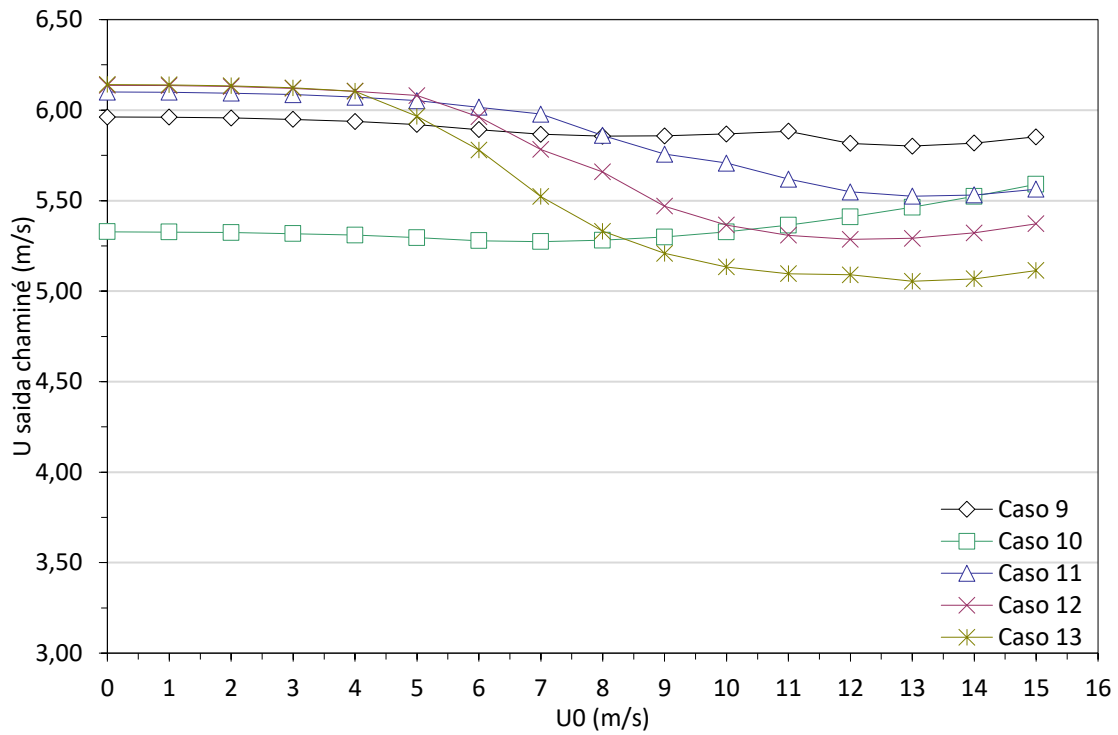


Figura 4.18: Velocidade à saída da chaminé (18) com $Q_1 = 237179000$ W para casos com diferentes áreas de aberturas de ventilação

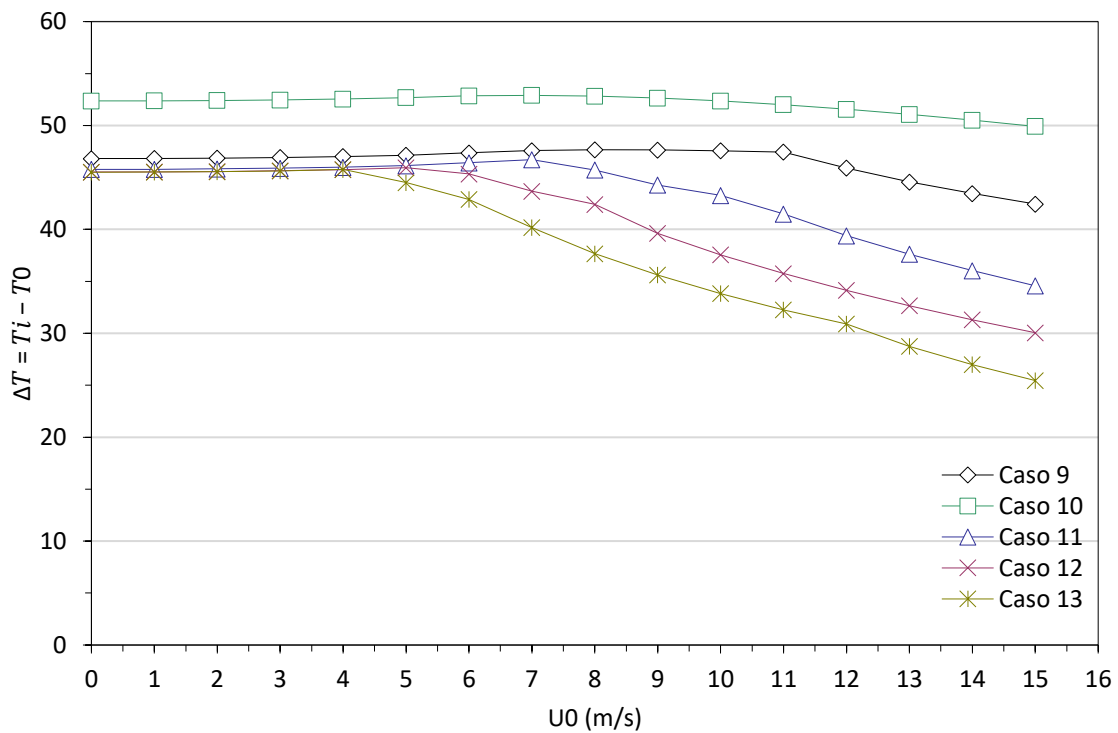


Figura 4.19: Variação da Temperatura no espaço interno (1) com $Q_1 = 237179000$ W para casos com diferentes áreas de aberturas de ventilação

4.7 Casos com presença de Curto Circuito

Designamos aqui por curto circuito, as situações em que o ar em vez de entrar por todas as aberturas de ventilação inferiores, entra e sai simultaneamente por algumas delas. Dando assim origem a uma pluma de condensação indesejável ao nível da base da torre, que por sua vez pode acarretar perigos para a saúde como a bactéria da legionella. Este fenómeno resulta do aumento das áreas das aberturas de ventilação, da diminuição da altura característica e do aumento da velocidade do vento exterior, e tem como resultado a saída do ar pelas aberturas com menores valores de CP. Este efeito pode ser observado na Figura 4.20.

A Figura 4.20 demonstra a título de comparação, os casos com estruturas iguais e diferentes áreas de aberturas de ventilação inferiores com $U_0 = 15 \text{ (m/s)}$, onde irá ocorrer o efeito de curto circuito.

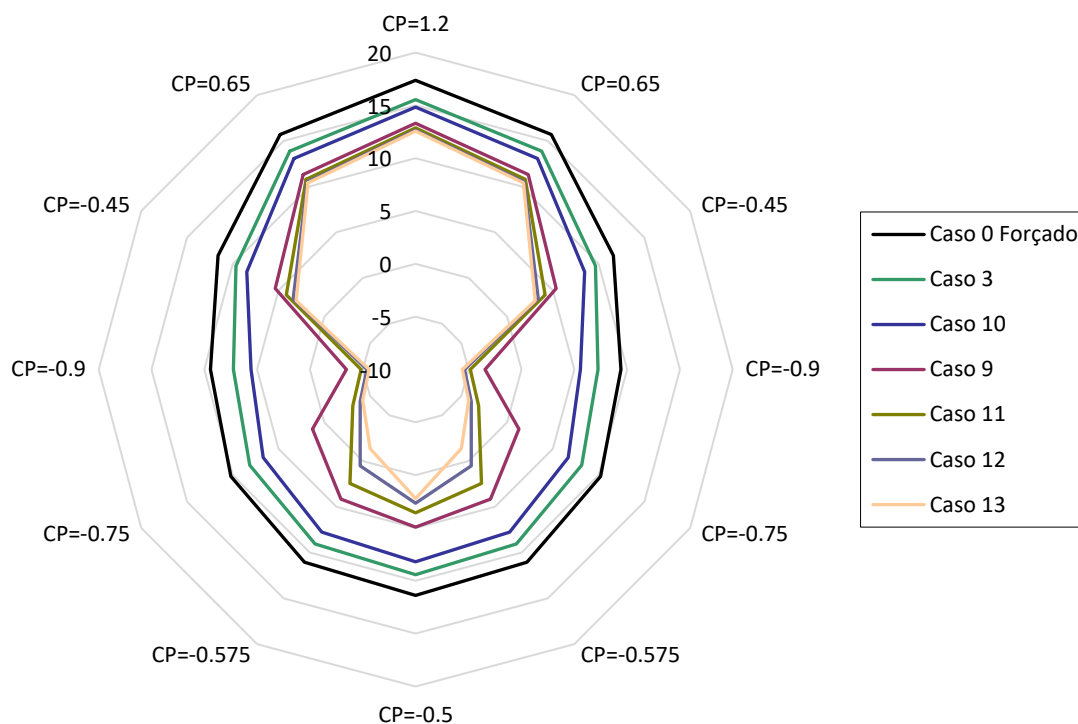


Figura 4.20: Velocidades nas aberturas de ventilação inferiores com os respetivos CPs para diferentes Casos e $U_0 = 15 \text{ (m/s)}$, com escala radial dos valores da velocidade

Verificamos assim, que o efeito tem início para aberturas de áreas com valores entre as do Caso 9 e 10 para $U_0 = 15 \text{ (m/s)}$.

4.7.1 Eliminação do Efeito de Curto Circuito

Para contrariar o efeito de curto circuito foi estudado um caso que simula a níveis práticos o fechar das aberturas de ventilação inferiores onde se observam valores negativos da velocidade.

Foi escolhido um caso onde ocorre o efeito, caso 9 com características presentes no capítulo anterior. Foi considerado $U_0 = 12 \text{ (m/s)}$ que corresponde à velocidade em que inicia o respetivo efeito, valores negativos da velocidade nas aberturas de ventilação. Para tal, foi necessário para as respetivas aberturas, diminuir a área para simular o fecho das mesmas.

Através da Tabela 4.2 e 4.3 é possível comparar o antes e o depois, verificando assim o comportamento da estrutura para as respetivas alterações.

Tabela 4.2: Comparação das variáveis das aberturas de ventilação inferiores do Caso 9 com $U_0 = 12 \text{ (m/s)}$

Abertura, k	Antes			Depois		
	C_{Pk}	A_k (m^2)	U_k (m/s)	C_{Pk}	A_k (m^2)	U_k (m/s)
1	1.2	72	10.9255	1.2	72	10.8619
2	0.65	72	9.3641	0.65	72	9.2898
3	-0.45	72	4.9323	-0.45	72	4.7897
4	-0.9	72	-1.2621	-0.9	0.001	-1.7260
5	-0.75	72	2.6547	-0.75	72	2.3793
6	-0.575	72	4.1385	-0.575	72	3.9675
7	-0.5	72	4.6311	-0.5	72	4.4789
8	-0.575	72	4.1385	-0.575	72	3.9675
9	-0.75	72	2.6547	-0.75	72	2.3793
10	-0.9	72	-1.2621	-0.9	0.001	-1.7260
11	-0.45	72	4.9323	-0.45	72	4.7897
12	0.65	72	9.3641	0.65	72	9.2898

Tabela 4.3: Comparação dos parâmetros para eliminação do efeito de curto circuito

Caso 9	Antes	Depois
Rph (1)	349.3092	339.9774
Rph (2)	122.1229	124.2943
ΔT (1)	45.9011	47.1581
ΔT (2)	45.4233	46.6757
U saída Chaminé (18) (m/s)	5.8160	5.9194

Analisando a Tabela 4.2 observa-se que, com a diminuição das áreas das aberturas o valor da velocidade manteve-se negativo, no entanto o caudal que passa pelas mesmas passou a ser desprezável.

Este por sua vez contribuiu para, observando a tabela 4.3, o escoamento de ar seja feito unicamente pelo interior da torre, aumentando assim a velocidade à saída da chaminé e por consequência o seu caudal de saída. No Entanto, como obtivemos menor caudal de ar a entrar nas aberturas de ventilação, observa-se que o número de renovações no espaço interno (1) diminui, logo a variação da temperatura aumenta em ambos os espaços.

5

CONCLUSÃO

Uma das motivações que levou à realização da presente dissertação e escolha do caso de estudo foi a particularidade de este ser de ventilação forçada, que por sua vez tem um consumo energético associado, de forma a contrariar essa despesa de energia foi realizado um estudo com o intuito de não ser necessário o uso de meios mecânicos, ventilação natural.

Através das modelações realizadas ao caso de estudo obtivemos o Caso 0 que corresponde à estrutura base para o estudo desenvolvido. Foram feitos vários casos com diferentes características com base no Caso 0 e em seguida feitas simulações variando a velocidade do vento exterior. Para esse conjunto de simulações foram analisados os resultados e comparados entre si.

Sumário dos resultados de maior relevância para cada conjunto de simulações:

1. Foi possível validar a equação de polinómio de segundo grau definida para o ventilador através do modelo simplificado da ventilação natural, comparando os valores obtidos da simulação com os valores esperados, calculados e definidos inicialmente pela modelação do Caso 0.
2. Verificou-se que, recorrendo à utilização dos ventiladores, na comparação do Caso 0 com ventilação Natural e Forçada, estes são predominantes face à velocidade do vento exterior, aumentando em valores consideráveis o caudal no seu interior e por consequência a diminuição da variação da temperatura.
3. Comparando a estrutura com paredes adiabáticas e não adiabáticas, verificou-se que, para os casos simulados, esta está sujeita a alterações mínimas nos parâmetros médios no seu interior.
4. Para as dimensões das estruturas definidas nos diferentes casos simulados de Ventilação Natural, apurou-se que o aumento das alturas de torre e o aumento das áreas das aberturas de ventilação inferiores, aumentam o caudal no seu interior e por consequência diminuem a variação da temperatura. O Caso 9 de Ventilação Natural com altura de torre de 130 m e áreas de aberturas de ventilação de 72 m^2 cada, corresponde ao caso com a maior aproximação de valores de caudal em relação aos do Caso 0 de Ventilação Forçada, considerado a modelação do caso de estudo.

5. Foi possível constatar, para valores elevados de altura de torre, áreas de aberturas de ventilação e velocidades exteriores do vento, que o efeito de curto circuito tem um enorme impacto no comportamento do ar no interior das torres, fazendo este escoar não só pela saída no topo da mesma, mas também através de algumas das aberturas de ventilação inferiores.
6. O efeito de curto circuito foi anulado através do fecho das aberturas por onde este escoava para o exterior da torre.

Limitações

Os resultados observados estão limitados pelas modelações realizadas ao caso de estudo. Uma das características de maior relevância numa torre como a do caso de estudo é a capacidade de arrefecimento da água, que por sua vez não é contabilizada no modelo simplificado da ventilação natural.

Trabalhos Futuros

Observando o presente trabalho desenvolvido e recorrendo à documentação técnica do caso de estudo, será possível estudar casos com diferentes dimensões e disposições estruturais com a finalidade de comparar e verificar o comportamento entre os mesmos. Como exemplo, a criação de um espaço interno onde se verifica a existência do enchimento da torre, com os expressores, cooling fill e drift eliminator panel, presentes em Anexo.

O modelo simplificado utilizado permitiu realizar o estudo em que se obtiveram os resultados apresentados. Poderá ser melhorado de modo a considerar o processo de evaporação da água. De maneira a complementar o trabalho desenvolvido seria também interessante considerar uma simulação CFD de alguma das situações analisadas.

No presente trabalho foi assumido, para os diferentes casos, que as áreas das aberturas interiores e de saída da chaminé são constantes, no entanto, seria de interesse verificar o comportamento da torre no modelo simulando casos em que os respetivos valores variassem e assim possibilitar uma torre de ventilação natural com uma menor altura.

O estudo de formas mais eficientes de contrariar o efeito de curto circuito.

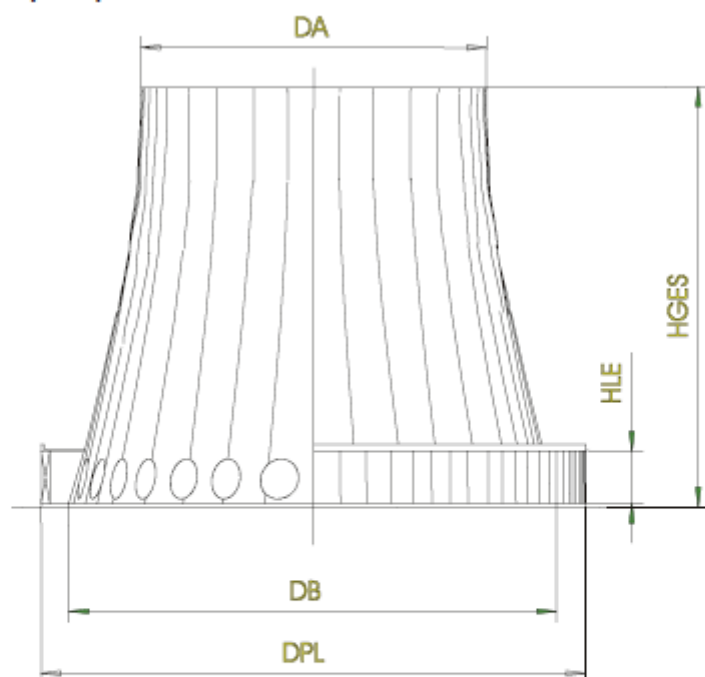
Referências Bibliográficas

- [1] J. C. Kloppers, “A critical evaluation and refinement of the performance prediction of wet-cooling towers”, University of Stellenbosch, 2003.
- [2] C. S. A. Pousinha, “Análise energética e económica de sistemas industriais de arrefecimento de água”, Instituto Superior Técnico, 2014.
- [3] J.M. Facão, “Arrefecimento Indirectas para Aplicação a Sistemas de Arrefecimento Ambiente”, FEUP, 1999.
- [4] F. M. N. M. Sampaio, “Projecto de uma Torre de Arrefecimento de 3 MW de Potência Térmica”, FEUP, 2010.
- [5] J. C. Hensley, *Cooling Tower Fundamentals*, SPX Cooling Technologies, USA, 2009
- [6] J. F. A. D. Delgado, A. R. J. Borges, and J. M. P. Conde, “Wind action and temperature difference effects on the ventilation rate of a two-storey building communicating with the outside environment by a chimney”. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 65, 1996.
- [7] J. A. G. Saraiva, J. F. A. D. Delgado, and A. R. J. Borges, “Pavilhões Industriais: Solicitações, Interferência e Ventilação Natural”, Universidade Nova de Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1985.
- [8] J. A. G. Saraiva, J. F. A. D. Delgado, and A. R. J. Borges, “Um Programa de Cálculo Automático (PCA) de Ventilação Natural: Ventil.For”, Universidade Nova de Lisboa; Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1985
- [9] J. F. B. N. L. Teixeira, “Estudo do comportamento de um edifício de habitação sujeito a ventilação natural e forçada”, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2009.
- [10] Ordem dos Engenheiros, “Central Termoelétrica do Ribatejo”, [online]: <https://www.ordemengenheiros.pt/pt/centro-de-informacao/dossiers/casos-de-estudo/central-termoelectrica-do-ribatejo/>
- [11] V. Baturin, *Fundamental of industrial ventilation*. Pergamon Press, 1972.
- [12] H. Riahi, M. Meldi, J. Favier, E. Serre, and E. Goncalves, “A pressure-corrected Immersed Boundary Method for the numerical simulation of compressible flows”, Institut Pprime, 2018

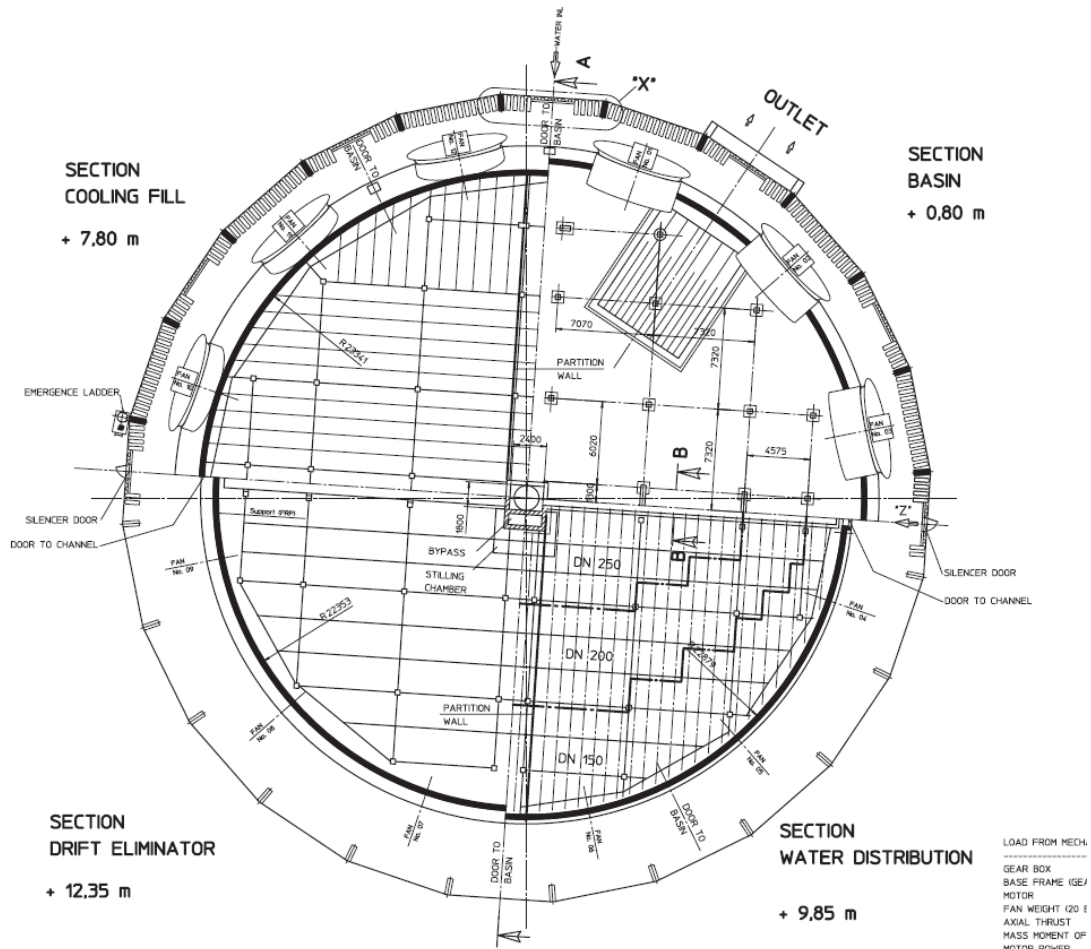
- [13] C. A. P. dos Santos, L. Matias, *Coeficiente de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios*, ITE50, Laboratório nacional de engenharia civil, Versão atualizada de 2006
- [14] DeWitt, Bergman, Lavine, *Fundamentals of heat and Mass Transfer*, Sixth Edition, Incropera

Anexo A: Estrutura

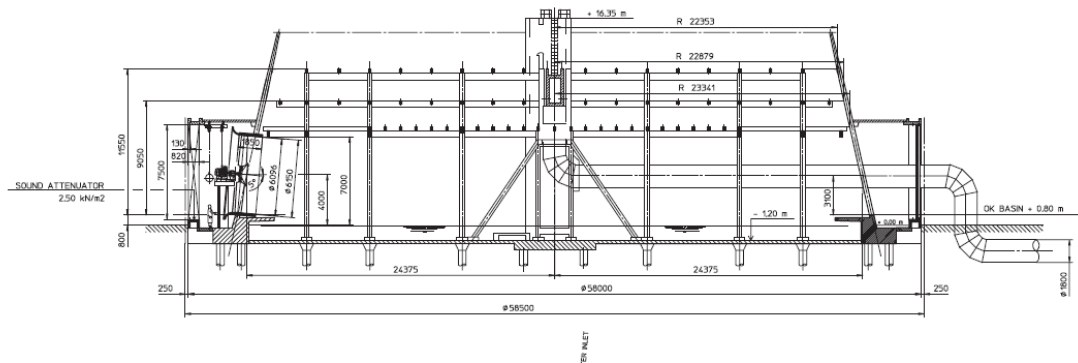
Dimensões principais 30 URA



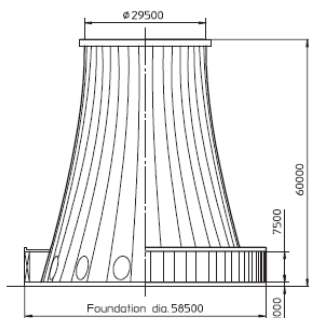
- bacia de água fria (prof.)	D_{CW}	2,00	m
- diâmetro exterior	D_{PL}	58,50	m
- diâmetro da base	D_B	50,30	m
- diâmetro de saída (interior)	D_A	29,50	m
- altura total da torre (a partir borda bacia)	H_{ges}	59,20	m
- altura total da torre (área acima)	H_{ges}	60,20	m



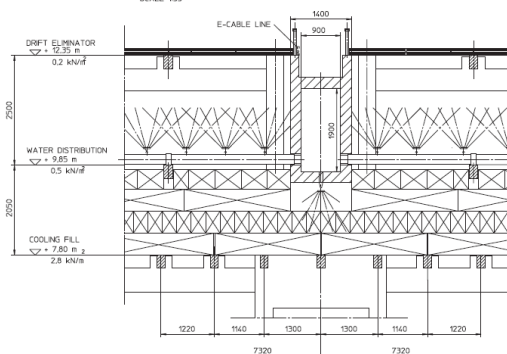
SECTION A - A



COOLING TOWER
SCALE 1:500



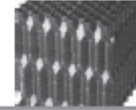
SECTION B - B
SCALE 1:33



Anexo B: Componentes de Enchimento da Torre

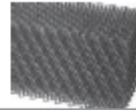
Cooling Fill

FILM FILL - GEA AF-20



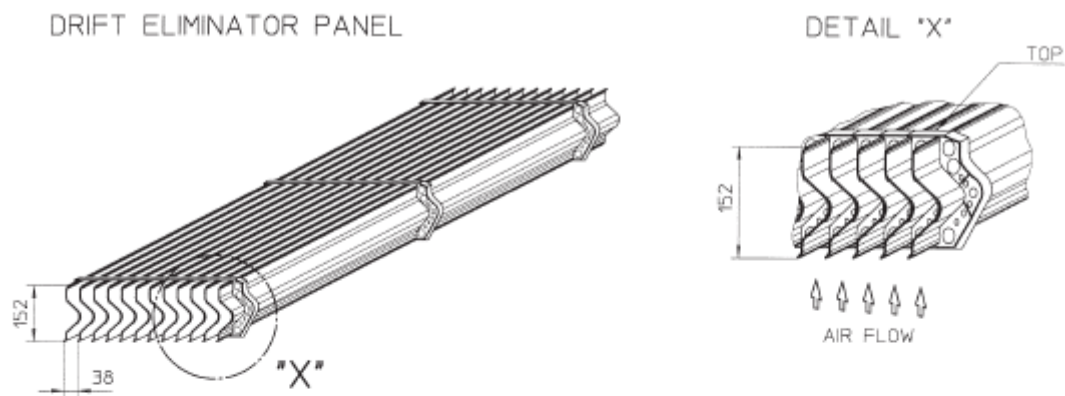
MATERIAL				PVC
WIDTH OF CHANNEL	mm			20
SLOPE OF CHANNEL	°			0
THICKNESS OF MATERIAL	mm			ca. 0,35
WEIGHT OF FILM	kg/m ²			0,49
WEIGHT OF BLOCK	kg/m ³			26
LENGTH OF BLOCK (GENERAL)	mm			≤ 2440
WIDTH OF BLOCKS	mm			310
HEIGHT OF BLOCKS	mm			500
VIEW AREA	m ² /m ³			--
EXCHANGE AREA	m ² /m ³			120
PROCESSING TEMPERATURE AT SITE (GLUE)	°C			--
MAX. OPERATING TEMPERATURE	°C			55
PROCEDURE OF MANUFACTURING			FORMING	
CONNECTION OF FILM TO BLOCKS				GLUED

TRICKLE GRID FILL - GEA NF-20



MATERIAL			PPs	
WIDTH OF CHANNEL	mm		20	
SLOPE OF CHANNEL	°		30	
THICKNESS OF MATERIAL	mm		ca. 1,8	
EDGE STIFFENING	mm		YES	
WEIGHT OF BLOCK	kg/m ³		36	
LENGTH OF BLOCK	mm		915	
WIDTH OF BLOCK	mm		VARIABLE	
HEIGHT OF BLOCK	mm		450	
VIEW AREA	m ² /m ³		--	
EXCHANGE AREA	m ² /m ³		118	
PROCESSING TEMPERATURE AT SITE (GLUE)	°C		--	
MAX. OPERATING TEMPERATURE	°C		80	
PROCEDURE OF MANUFACTURING			INJECTION MOULDING	
CONNECTION OF FILM TO BLOCKS			FIXED WITH PINS	

Drift Eliminator



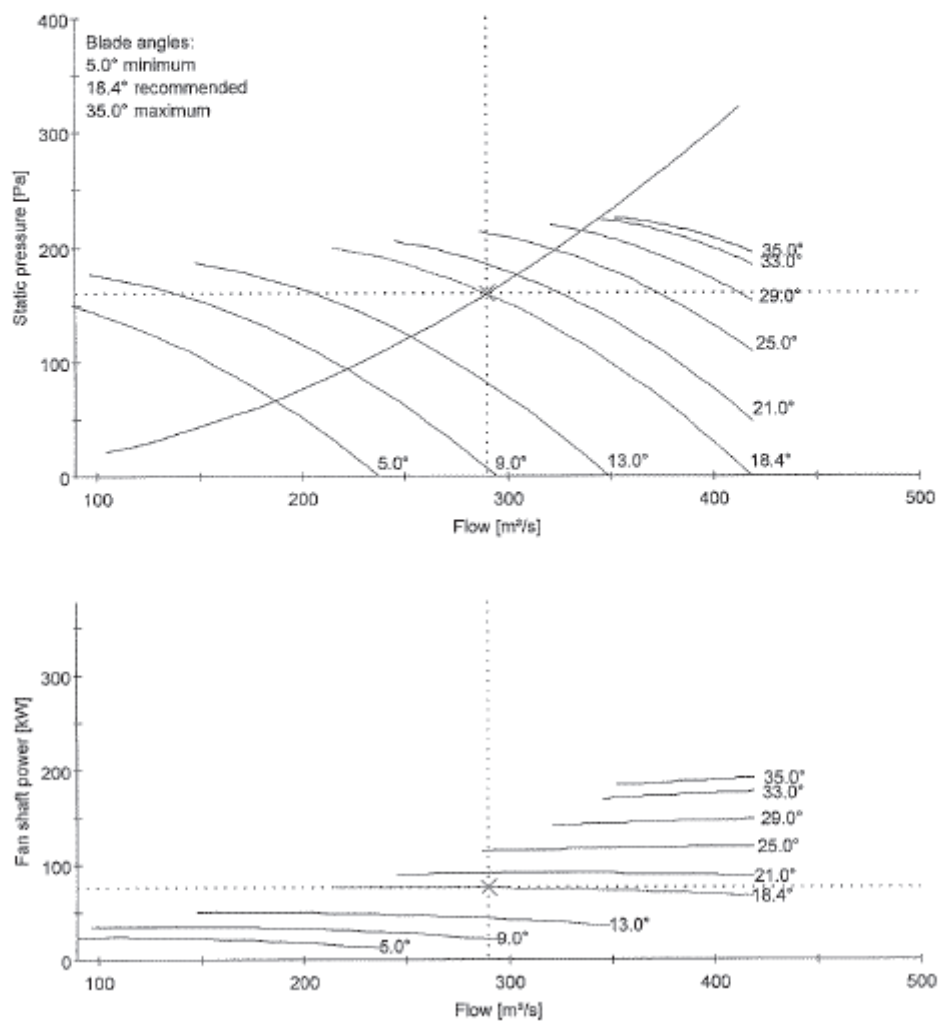
Material:	PPs		
Dimensions:	Blade:	Lenght:	variable
		Height	152mm
		Thickness:	ca. 2mm
		Pitch:	38mm
	Spacer:	Lenght:	ca. 112mm
		Height	175mm
		Thickness:	15mm
Manufacturer:	Blade:	Hewitech	
	Spacer:	Hewitech	
Document-N°.:	Blade:	37.13.0159.08 ;	705062
	Spacer:	37.13.0146.08 ;	705061

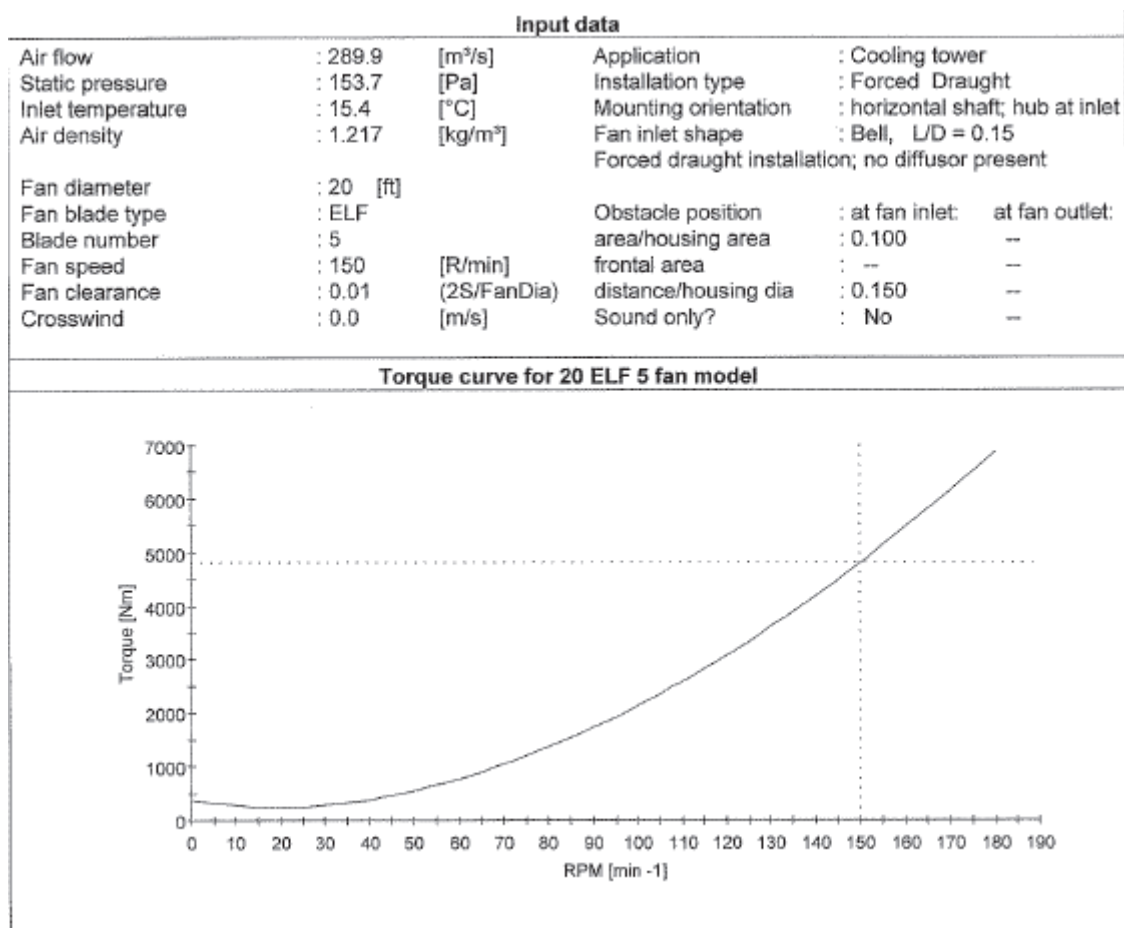
Anexo C: Ventiladores

Input data					
Air flow	: 289.9	[m³/s]	Application	: Cooling tower	
Static pressure	: 153.7	[Pa]	Installation type	: Forced Draught	
Inlet temperature	: 15.4	[°C]	Mounting orientation	: horizontal shaft; hub at inlet	
Air density	: 1.217	[kg/m³]	Fan inlet shape	: Bell, L/D = 0.15	
			Forced draught installation; no diffuser present		
Fan diameter	: 20	[ft]	Obstacle position	: at fan inlet:	at fan outlet:
Fan blade type	: ELF		area/housing area	: 0.100	--
Blade number	: 5		frontal area	: --	--
Fan speed	: 150	[R/min]	distance/housing dia	: 0.150	--
Fan clearance	: 0.01	(2S/FanDia)	Sound only?	: No	--
Crosswind	: 0.0	[m/s]			
Selection result: 20 ELF 5 fan model					
			Sound power spectrum		
Blade tip speed	: 47.9	[m/s]	Octave	PWL	PWL(A) Tolerance
Fan speed	: 150.0	[R/min]	[Hz]	[dB]	[dB(A)] [dB]
Blade tip angle	: 18.4	[°]	63	104.5	78.3 5
Static efficiency	: 61.1	[%]	125	104.5	88.4 3
Total efficiency	: 83.2	[%]	250	100.5	91.9 2
Fan shaft power	: 75.4	[kW]	500	97.5	94.3 2
Pressure margin [%]	: 40.8 ¹ / 22.8 ²		1000	94.5	94.5 2
Air flow margin [%]	: 18.7 ¹ / -33.1 ²		2000	86.5	87.7 2
¹ according to API	² at selected blade angle		4000	82.5	83.5 2
			8000	78.5	77.4 2
Impeller Sound Power Level	: 98.0	[dB(A)]	Tolerance on sound level values ± 2 [dB(A)]		
Sound due to blade angle	: 0.0	[dB(A)]	SPL 1m beside inlet	: 76.4	[dB(A)]
Sound due to inlet shape	: 0.0	[dB(A)]	SPL 1m below inlet at 45°	: 77.7	[dB(A)]
Sound due to inlet obstacles	: 1.3	[dB(A)]	SPL 1m below inlet	: 82.4	[dB(A)]
Sound due to outlet obstacles	: 0.0	[dB(A)]	Reflections not considered!		
Total Sound Power Level	: 99.3	[dB(A)]			
! SPL levels for guidance only !					
See Howden Cooling Fans Manual for explanation of SPL calculations; norm 03-07.334.					
Inlet pressure loss	: 0.0	[Pa]	Max. allowed tip speed	: 49.7	[m/s]
Inlet obstacle pressure loss	: 5.1	[Pa]	Max. allowed blade angle	: 35.0	[°]
Fan clearance pressure loss	: 0.0	[Pa]	Max. allowed blade temp.	: 65.0	[°C]
ACHE pressure recovery	: 0.0	[Pa]	Impeller mass	: 572	[kg]
Outlet obstacle pressure loss	: 0.0	[Pa]	Impeller moment of inertia	: 997	[kg.m²]
Crosswind pressure loss	: 0.0	[Pa]	Axial thrust	: 6292	[N]
Corrected Fan Static Pressure	: 158.8	[Pa]	Force due to loss of 1 blade(s)	: 21635	[N]
Dynamical pressure	: 57.7	[Pa]	Residual imbalance force (G6.3)	: 57	[N]
Dimensionless flow Cf	: 0.207	[-]	Blade natural frequency	: 6.1	[Hz]
Dimensionless pressure Cp	: 0.114	[-]	Blade operating natural frequency	: 6.8	[Hz]
			Operating frequency	: 2.5	[Hz]
			Blade passing frequency	: 12.5	[Hz]

Input data					
Air flow	: 289.9	[m³/s]	Application	: Cooling tower	
Static pressure	: 153.7	[Pa]	Installation type	: Forced Draught	
Inlet temperature	: 15.4	[°C]	Mounting orientation	: horizontal shaft; hub at inlet	
Air density	: 1.217	[kg/m³]	Fan inlet shape	: Bell, L/D = 0.15	
			Forced draught installation; no diffuser present		
Fan diameter	: 20	[ft]	Obstacle position	: at fan inlet:	: at fan outlet:
Fan blade type	: ELF		area/housing area	: 0.100	--
Blade number	: 5		frontal area	: --	--
Fan speed	: 150	[R/min]	distance/housing dia	: 0.150	--
Fan clearance	: 0.01	(2S/FanDia)	Sound only?	: No	--
Crosswind	: 0.0	[m/s]			

Selection graph for 20 ELF 5 fan model





Anexo D: Dados Termo-Hidráulicos

Dados termo-hidráulicos no ponto de concepção 30 PAD

São fornecidos os seguintes dados termo-hidráulicos para cada unidade:

- caudal de água	(m_{W1})	20.858	t/h
- temperatura da água quente(t_{W1})		30.9	°C
- temperatura da água fria(t_{W2})		20.8	°C
=> amplitude de arrefecimento		10.1	K
=> calor libertado	(Q)	237 179	kW
- temperatura de bolbo húmido(t_{F1})		12.8	°C
- temperatura em ampola seca(t_{L1})		15.4	°C
=> humidade relativa	(ϕ)	75	%
- pressão atmosférica		1013	mbar

Dados de performance

- perda por evaporação	(m_{W0})	1,29	% of m_{W1}
- perda por deriva	(m_{WS})	0,005	% of m_{W1}
- potência do eixo da pá do ventilador (por ventilador)		77	kW
- número de ventiladores por unidade		12	
- nível de potência sonora na entrada do ar		99	dB(A)
- nível de potência sonora na saída do ar		107	dB(A)

Condições extremas ($t_{L1}=40.2^{\circ}\text{C}$, $\phi = 72\%$)

- temperatura da água quente(t_{W1})		47.5	°C
- temperatura da água fria(t_{W2})		37.4	°C
- perdas por evaporação	(m_{W0})	1.62	of m_{W1}